

# RE4Industry Broschüre



## RE4iNDUSTRY

Renewable energies for industries

**Auf dem Weg zur 100%  
Dekarbonisierung  
Energieintensiver  
Industrien durch  
die Einbindung  
Erneuerbarer  
Energien**



Dieses Projekt wurde mit Fördermitteln aus dem Horizont 2020 Forschungs - und Innovations Programm der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 952936 finanziert.



RE4iNDUSTRY  
Renewable energies for industries



# Informationen zu RE4Industry

- Autoren:** Olgu Birgi, Rainer Janssen
- Herausgeber:** Alessandro Carmona, Patrick Reumerman, Manolis Karampinis, Andreas Ziogos
- Beitragende:** Asier Rueda, Aimilia Lympeti, Manolis Karampinis, Alessandro Carmona, Alejandro Fresneda, Irene Bolea, Clara Jarauta Córdoba, Georgios Zisopoulos, Myrto Zeneli, Panagiotis Grammelis, Olgu Birgi, Rainer Janssen, Asier Zubero, Martijn Vis, Bas Davidis, Patrick Reumerman, Maria Proenca, Suzanne Verhoef, Katia Paglé, Ioannis Karnachoritis, Marina Papageorgiou, Cosette Khawaja, Martijn Vis, Emmanouil Karampinis, Ana Sofia Praxedes
- Übersetzung:** Susanne Schroll
- ISBN:** 3-936338-87-6
- Veröffentlicht:** © 2023 von WIP Renewable Energies, München, Deutschland
- Kontakt:** WIP Renewable Energies  
Sylvensteinstr. 2, 81369 München, Deutschland  
[olgu.birgi@wip-munich.de](mailto:olgu.birgi@wip-munich.de), Tel: +49 89 72012765  
[www.wip-munich.de](http://www.wip-munich.de)
- Webseite:** <https://re4industry.eu>
- Urheberrecht:** Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form oder mit irgendwelchen Mitteln zu kommerziellen Zwecken vervielfältigt werden. Die Autoren übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit und/oder Vollständigkeit der in dieser Broschüre enthaltenen oder beschriebenen Informationen und Daten.



## Haftungsausschluss:

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizont 2020 der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 952936 finanziert. Die in diesem Bericht enthaltenen Informationen und Ansichten sind die der Autoren und spiegeln nicht unbedingt die offizielle Meinung der Europäischen Union wider. Weder die Organe und Einrichtungen der Europäischen Union noch die in ihrem Namen handelnden Personen können für die Verwendung der folgenden Informationen verantwortlich gemacht werden.



Dieses Projekt wurde mit Fördermitteln aus dem Horizont 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 952936 finanziert.



Die EU hat eine schrittweise Dekarbonisierung eingeleitet, mit dem ehrgeizigen Ziel, bis 2050 kohlenstoffneutral zu werden. Darüber hinaus haben die russische Invasion in der Ukraine und die COVID-19-Krise die unmittelbare Notwendigkeit, von fossilen Brennstoffen unabhängig zu sein, und die Bedeutung der Energiesicherheit noch deutlicher gemacht. Lösungen im Bereich der Erneuerbaren Energien werden eine wichtige Rolle bei der Verringerung der Treibhausgasemissionen und der Gewährleistung der Energiesicherheit durch die lokale Erzeugung sauberer und nicht erschöpfbarer Energie spielen.

Es wird erwartet, dass die Energieintensiven Industrien (EII) bei der Energiewende eine wichtige Rolle spielen, da sie für 24 % des Endenergieverbrauchs verantwortlich sind. Eine klare, langfristige Vision und Strategie ist erforderlich, um wettbewerbsfähig zu bleiben und gleichzeitig zu den Zielen der Dekarbonisierung der EU beizutragen.

In diesem Sinne zielt das Projekt darauf ab, der Energieintensiven Industrie (EII) in Europa einen reibungslosen und sicheren Übergang zur Nutzung Erneuerbarer Energien (EE) in ihren Produktionsprozessen und Anlagen aufzuzeigen. Das Projekt begleitet EII und ihre Verbände auf ihrem Weg zu einer vollständigen Dekarbonisierung bis 2050, indem es eine Vision und Anleitung zur Entwicklung einer langfristigen Strategie für eine kohärente und sicherere Nachrüstung und Integration von aktuellen und zukünftigen EE-Lösungen in Anlagen und Prozessen bietet.

## Ziel der Broschüre

Diese Broschüre fasst die im Rahmen des RE4Industry-Projekts geleistete Arbeit zusammen und dient Akteuren der Industrie als Leitfaden für eine erfolgreiche Dekarbonisierung ihrer Sektoren.

Die Broschüre beginnt mit einem Überblick über die Energieintensiven Industrien (EII) und ihren Status in der EU. Im dritten Kapitel werden Erfolgsbeispiele für die Integration Erneuerbarer Energien in EII präsentiert. Die Ergebnisse aus den drei industriellen Fallstudien von Corbion, Sidenor und Mytilneos werden in Kapitel vier präsentiert. Schließlich werden in Kapitel vier verschiedene Technologien für Erneuerbare Energien dargestellt, die für die Wärme- und Stromerzeugung in EII genutzt werden können.

Am Ende der Broschüre werden die Projektpartner von RE4Industry kurz vorgestellt.

# Inhaltsverzeichnis

Informationen über RE4Industry	3
Ziel der Broschüre	3
1- Status des EII-Sektors in der EU	6
Buntmetalle	8
Zement	10
Kalk	12
Chemie	14
Stahl	16
Glas	18
2- Lösungen für Erneuerbare Energien	20
Erneuerbarer Strom	21
Erneuerbare Wärme	22
Solarthermie	23
Wärmepumpen	24
Geothermie	25
Biomasse	26
Biokraftstoffe	27
Grüner Wasserstoff	28
3- Erfolgsbeispiele für die Integration Erneuerbarer Energien in EII's	30
ArcelorMittal Stahlwerk in Gent	31
Stromerzeugung mittels Photovoltaik in der Stahlindustrie – Ebroacero	32
Mitverwertung von Biomasse in der Zementindustrie/das Zementwerk Milaki von HERACLES-Holcim	33
Mitverbrennung von Biokraftstoffen in Öfen der Glasindustrie Verallia Spain S.A (Zaragoza)	34
Solar-PV-Nutzung im Solarpark Witnica	35
4- Fallstudien zu Erneuerbaren Energien in EII's	36
Mytilineos	37
Corbion	38
Sidenor	39
Vorstellung der Projektpartner	40
Technologische und sozio-ökonomische Expertise	40
Verbände für Erneuerbare Energien	41
Energieintensive Industrien	41

# Abbildungen

Abbildung 1: CO <sub>2</sub> Emissionen der Energieintensiven Industrien im Rahmen des EU-ETS, EU27, 2008-2018	6
Abbildung 2: CEMBUREAU Roadmap zur CO <sub>2</sub> -Reduzierung entlang der Wertschöpfungskette von Zement	11
Abbildung 3: Treibhausgasemissionen im Chemiesektor der EU, in Millionen Tonnen (CO <sub>2</sub> Äquivalent)	15
Abbildung 4: Global gewichtete durchschnittliche Energiekosten (grün) und Auktionspreise für Stromabnahmeverträge (rot) für Solar-Photovoltaik, On-/Offshore-Windkraft und konzentrierende Solarenergie zwischen 2010 und 2023. Quelle: IRENA	21
Abbildung 5: Dampfkomppressionskreislauf für gleichzeitiges Heizen und Kühlen	24
Abbildung 6: Langfristige wirtschaftliche Potenziale für verschiedene geothermische Anwendungen in Europa in drei verschiedenen Bereichen	25
Abbildung 7: Die wichtigsten Technologien zur thermochemischen Umwandlung von Biomasse. Eigener Entwurf, basierend auf Informationen	26
Abbildung 8: Die Farben des Wasserstoffs	28
Abbildung 9: Wege zu erneuerbarem Wasserstoff und derzeitiger Entwicklungsstand	29
Abbildung 10: Windturbinen und Solarkollektoren im ArcelorMittal-Werk in Gent	31
Abbildung 11: Lokale Photovoltaikanwendungen, Quelle: Ebroacero	32
Abbildung 12: Biomasselager (links) & Nahaufnahme (rechts)	33
Abbildung 13: Mit Biokraftstoff aus Raps betriebener LkW in der Champagne, Quelle: Verallia	34
Abbildung 14: Luftbild des Solarparks Witnica, Quelle: ceenergynews	35
Abbildung 15: Hauptblöcke der AoG-Anlage und des erdgasbefeuerten Heizkraftwerks	37
Abbildung 16: Standort des Corbion-Hauptsitzes, der Produktionsstandorte, der Vertriebsbüros und Innovationszentren	38
Abbildung 17: SIDENOR's production centers	39

# Tabellen

Tabelle 1: Überblick über Beispiele verfügbarer Technologien für Energieintensive Industrien	7
Tabelle 2: Energieverbrauch von Buntmetallen, Treibhausgasemissionen und Innovationen zur Dekarbonisierung	9
Tabelle 3: Durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Emissionen für Kalkprodukte (EuLA, 2012)	13
Tabelle 4: Endenergieverbrauch in der Eisen- und Stahlerzeugung im Jahr 2015	16
Tabelle 5: Wichtigste Produkte der Glasbranche	18
Tabelle 6: Innovative Technologien zur Dekarbonisierung der Glasindustrie	19
Tabelle 7: Lösungen für erneuerbaren Strom und Wärme	20
Tabelle 8: Kollektortypen und deren Temperaturbereich	22
Tabelle 9: Vergleich von Erdgas, Biogas und Biomethan	27
Tabelle 10: Überblick über RE4Industry Fallstudien	30
Tabelle 11: Vergleich von Lösungen für Erneuerbare Energien für die Fallstudie von SIDENOR	39

# 1- Status des EII-Sektors in der EU

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der energieintensiven Industriezweige in Europa:

- Buntmetalle
- Zement
- Kalk
- Chemie
- Stahl
- Glas

Das Kapitel enthält Informationen über das Profil der Energie- und Treibhausgasemissionen (THG) der ausgewählten Sektoren in Europa. Darüber hinaus werden Wege zur und Alternativen für die Dekarbonisierung der Sektoren vorgestellt.

Energieintensive Industrien sind wichtige Wirtschaftszweige in Europa. In der EU27 sind schätzungsweise 3,2 Millionen Menschen in den Branchen Eisen und Stahl, Mineralien, Raffinerien und Chemie beschäftigt. Dies entspricht etwa 11% der gesamten industriellen Beschäftigung. In der EU27 machen diese vier Branchen 15% der gesamten Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes aus.<sup>1</sup>

Energieintensive Industrien bewegen sich in einer dynamischen politischen Landschaft, da sich die Klimapolitik schnell weiterentwickelt. Vor dem Hintergrund des Pariser Abkommens haben die Europäische Kommission, das Europäische Parlament und die Mitgliedstaaten ehrgeizige Maßnahmen ergriffen, um die Treibhausgasemissionen (THG) mit den politischen Zielen in Einklang zu bringen. Derzeit werden die Treibhausgasemissionen dieser Branchen hauptsächlich durch das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) reguliert, ein europaweites politisches Instrument, das die Emissionen von über 12.000 Anlagen überwacht. Die Teilnehmer des EU-Emissionshandelssystems müssen ihre Kohlendioxid- (CO<sub>2</sub>) und anderen Treibhausgasemissionen überwachen und melden und Genehmigungen für diese Emissionen einholen. Im Einklang mit den Zielen der EU zur Emissionsreduzierung zeigt Abbildung 1, dass die Emissionen der Energieintensiven Industrien, die am EU-ETS teilnehmen, von 2008 bis 2012 zurückgegangen sind, sich aber seit 2013 auf einem Plateau befinden.

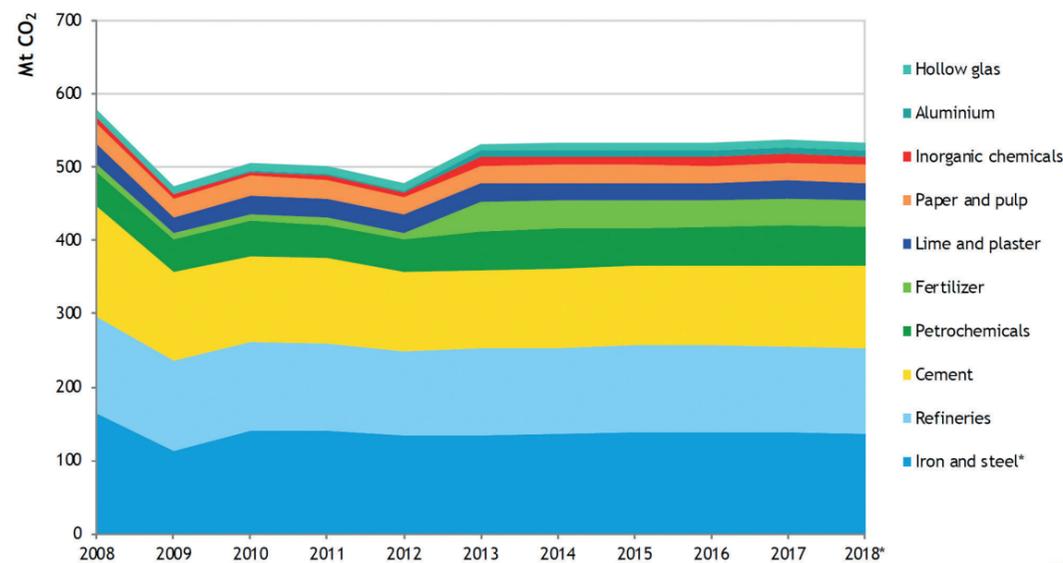


Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Emissionen im EU-EHS aus den Energieintensiven Industrien, EU27, 2008-2018, Quelle: EUTL-Daten, Berechnungen von CE Delft. \* Vorläufige Daten BTA

Im Bericht des EU-Parlaments über Energieintensive Industrien werden die folgenden Beispiele für Technologiepfade angeführt (Tabelle 1). Es ist wichtig zu erkennen, dass mehrere Technologien, insbesondere in den Bereichen Elektrifizierung, CCU (Carbon Capture and Utilization) und Wasserstoff, von der Verfügbarkeit erneuerbarer Stromquellen abhängen. Diese Technologien sind daher eng mit dem Fortschritt des Stromsektors verbunden. Umgekehrt können Maßnahmen in den Bereichen Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft, Prozessinnovation und CCS (Carbon Capture and Storage) die CO<sub>2</sub>-Emissionen direkt reduzieren. Bis der Stromsektor jedoch Kohlenstoffneutralität erreicht, kann ein Anstieg der Stromnachfrage die Verringerung der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen verzögern und den Gesamtfortschritt in Richtung Klimaneutralität in der Wirtschaft behindern.

Tabelle 1: Überblick über Beispiele verfügbarer Technologien für Energieintensive Industrien

Sektor	Eisen und Stahl	Zement und Kalk	Chemikalien, Polymere und Düngemittel	Raffinerien
<b>Kreislaufwirtschaft</b>	Schrottreycling, Ersatz durch Holz im Bauwesen	Recycling von Beton	Hochwertigeres Kunststoff-Recycling, Naphtha aus Kunststoffabfällen, geringerer Einsatz von Düngemitteln	Recycelte Kohlenstoffkraftstoffe Reduzierung der Nachfrage durch Elektromobilität
<b>Elektrifizierung</b>	Elektrolichtbogenöfen, Elektrolyse von Eisenerz		Cracker der Zukunft, Elektroboiler	Wärmepumpen, Elektroboiler
<b>Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCUS)</b>	Verfügbare Prozesse und laufende Projekte: ULCOS, Hlsarna, Steel2chemicals, Steelanol	Prozesse und Projekte: LEILAC, Mineralisierung	CCUS für Dampfreformierungs- und Oxyfuelverfahren	Synthetische Kraftstoffe, Abscheidung/CCUS für Dampfreformierungsverfahren
<b>Wasserstoff (H<sub>2</sub>)</b>	H <sub>2</sub> -Prozesse und Projekte: Direktreduziertes Eisen: HYBRIT, SALCOS, H <sub>2</sub> Future	Hoch-Temperatur Wärmestoffe	H <sub>2</sub> aus Elektrolyseuren, Hoch-Temperatur Wärmestoffe	Hoch-Temperatur Wärme
<b>Biomasse</b>	Hochöfen auf Biokoksbasis	Biofüllstoffe, biogasbefeuerte Öfen	Biobasierte Rohstoffe: MeOH, EtOH, bioBTX, H <sub>2</sub> aus Biogas	Biokraftstoffe, Biorohstoffe als Input
<b>Weitere Prozessinnovationen</b>	Hlsarna	Kohlenstoffarmer Zement, CO <sub>2</sub> Karbonatisierung	Katalytische Ethylen-Cracker, neuartige Abscheidungstechniken	Neuartige Abscheidungstechniken

# Buntmetalle

Buntmetalle sind die Metalle (einschließlich Legierungen), die kein Eisen (Ferrit) in großen Mengen enthalten. Buntmetalllegierungen haben im Allgemeinen eine Eisenzusammensetzung von weniger als 1 %, gemessen am Gewicht.

Buntmetalle werden im Allgemeinen in vier Hauptgruppen eingeteilt, darunter **unedle Metalle, Edelmetalle, Sondermetalle und seltene Metalle.**<sup>2</sup>

## Überblick über den europäischen Buntmetallsektor

- Umsatz: **120 Milliarden €**
- Rund **500.000** direkt **Beschäftigte**
- Mehr als **2 Millionen** indirekt **Beschäftigte**<sup>3</sup>

Da es in Europa an Reserven mangelt, ist man in hohem Maße auf die Einfuhr von Metallerzen aus anderen Kontinenten angewiesen.

## Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Buntmetallindustrie ist die am stärksten elektrifizierte aller energieintensiven Industrien, mit einem **Anteil von 58 % Strom** am Gesamtenergieverbrauch. Infolgedessen reagiert die Buntmetallindustrie **sehr viel empfindlicher auf steigende Strompreise** als andere verarbeitende Industrien.<sup>4</sup>

Andererseits hat die Buntmetallindustrie in der EU ihre absoluten (direkten und indirekten) Emissionen **seit 1990** bereits um **61 %** gesenkt, was weltweit die höchste Reduktion darstellt, und sie hat das Potenzial, die Treibhausgasemissionen **bis 2050 um mehr als 90 %** zu reduzieren.<sup>5</sup>

## Energieeffizienz und Innovationen zur Dekarbonisierung

Tabelle 2 zeigt die am häufigsten verwendeten Buntmetalle, den Energieverbrauch und die THG-Emissionen, die von diesen Metallen herrühren, sowie Energieeffizienz und Innovationen, die die Dekarbonisierung dieser Sektoren unterstützen.

Effizienz (insbesondere bei den Elektrolyseverfahren), Einsatz alternativer Brennstoffe, Elektrifizierung, Wärmerückgewinnung und CCUS sind die wichtigsten Wege zur Dekarbonisierung des Buntmetallsektors.

Tabelle 2: Energieverbrauch von Buntmetallen, Treibhausgasemissionen und Innovationen zur Dekarbonisierung<sup>6</sup>

	Energieverbrauch	THG (Gesamtemissionen pro Jahr)	Energieeffizienz & Innovationen zur Dekarbonisierung
Al	14-16 MWh Stromverbrauch pro Tonne: (Primärproduktion)	17.4 Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent (2015)	Effizienz im Elektrolyseverfahren, CCS
Cu	Stromverbrauch pro Tonne: 1,5 MWh Gesamtenergieverbrauch pro Tonne: 3,3 MWh	4,439 Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent (2015)	Effizienz im Elektrolyseverfahren, alternative Brennstoffe (Wasserstoff, synthetische Brennstoffe), Abwärmenutzung
Ni	Raffinierung: 5-5,5 MWh, Schwebeschmelzöfen: 2,6-2,8 MWh	348,46 kt CO <sub>2</sub> -Äquivalent (2015)	Elektrifizierung verschiedener Prozesse, z. B. elektrische Heizung und Gaserzeugung Effizienz bei der Wärmerückgewinnung, CCS
Zn	Stromverbrauch pro Tonne: 3,8 MWh	3,394 Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent (2015)	CCU e.g. algea Project (Finnfjord AS, the Arctic University of Norway), CCS
Silizium & Eisenlegierungen	Stromverbrauch pro Tonne: Silizium 12,4 MWh, Ferrosilizium 8,9 MWh, Ferromangan 3 MWh	Silizium 8,4, Ferrosilizium 6,3, Ferromangan 1,5 Mt CO <sub>2</sub> -Äquivalent	CCU (z. B. Algae Projekt), CCS

Eurometaux ([www.eurometaux.eu](http://www.eurometaux.eu)) ist ein Verband, der die Interessen der Buntmetallindustrie in Europa vertritt. Zu seinen Mitgliedern gehören Hersteller, Verarbeiter und Recycler von Buntmetallen, sowie europäische und nationale Metallverbände. Im Oktober 2019 veröffentlichte Eurometaux einen Bericht mit dem Titel „Metals for a Climate-Neutral Europe: A 2050 Blueprint“, der das Potenzial und die Herausforderungen untersucht, denen sich die europäische Buntmetallindustrie stellen muss, um das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Um diese Ziele zu erreichen, schlägt der Eurometaux-Fahrplan mehrere Maßnahmen vor. Darunter die Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen, die Nutzung erneuerbarer Energiequellen, die Förderung der Kreislaufwirtschaft durch Recycling und Wiederverwendung von Materialien und die Entwicklung neuer kohlenstoffarmer Produktionstechnologien.

<sup>2</sup> RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1: Non-ferrous metals sector status in Europe

<sup>3</sup> T. Wyns and G. Khandekar, "Metals for a Climate Neutral Europe - A 2050 Blueprint," 2020. [Online]. Available: <https://www.eurometaux.eu/metals-blue-print-2050/>

<sup>4</sup> Energy balance sheets 2016 DATA 2018 edition. 2018.

<sup>5</sup> T. Wyns and G. Khandekar, "Metals for a Climate Neutral Europe - A 2050 Blueprint," 2020. [Online]. Available: <https://www.eurometaux.eu/metals-blue-print-2050/>

# Zement

Zement ist der Hauptbestandteil bei der Herstellung von Beton, und Beton ist der mengenmäßig am häufigsten verwendete Baustoff. Beton ist erschwinglich, robust, dauerhaft und widerstandsfähig gegen Feuer, Überschwemmungen und Schädlinge. Er ist flexibel genug, um komplexe und massive Strukturen auszubilden. Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach Beton und damit nach Zement bis 2050 um 12-23 % steigen wird, da Bevölkerung und Wirtschaft wachsen.<sup>6</sup>

## Überblick über den europäischen Zementsektor

Nach den Daten von Eurostat hat die Zementindustrie in der EU

- Umsatz: **15,2 Milliarden €**  
Wertschöpfung: **4,8 Milliarden €**
- Arbeitsplätze: Ca. **47.000 Personen** in Europa im Jahr 2019<sup>7</sup>
- Verteilt auf rund **350 Unternehmen**

## Energieverbrauch und THG-Emissionen

Die Zementproduktion ist für **8 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit** verantwortlich. Die Zementherstellung ist sehr energieintensiv, 50-60 % der Produktionskosten sind mit den Energiekosten verbunden. Der typische elektrische Energieverbrauch eines modernen Zementwerks beträgt etwa **110-120 kWh pro Tonne Zement** und **erfordert je nach Zementsorte 60 bis 130 kg Heizöl oder dessen Äquivalent**.<sup>8</sup>

Die Zementherstellung ist eine der größten Quellen für Kohlendioxidemissionen in der Welt. Diese Emissionen stammen aus zwei Hauptquellen: energiebedingte Emissionen und prozessbedingte Emissionen.

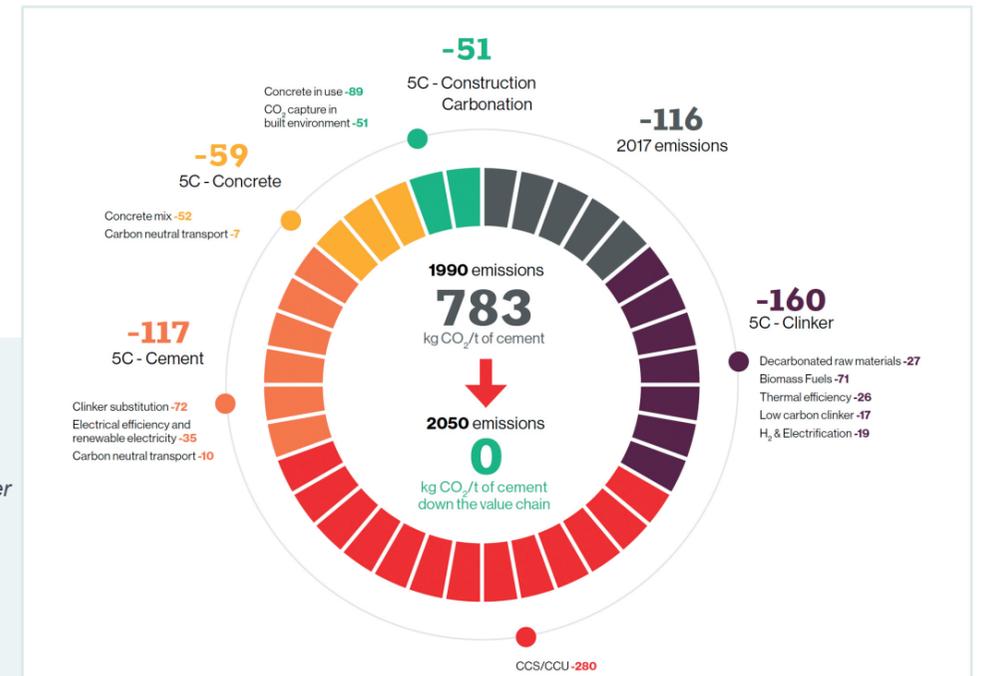
Energiebedingte Emissionen bei der Zementherstellung entstehen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, um die hohen Temperaturen zu erreichen, die zur Herstellung von Klinker, dem Hauptbestandteil von Zement, erforderlich sind. Zu diesem Zweck werden in der Regel fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas verwendet. Zu den Emissionen aus der Verbrennung dieser Brennstoffe gehören Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sowie andere Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O).

Zusätzlich zu den energiebedingten Emissionen ist bekannt, dass die Zementindustrie bei ihren Produktionsprozessen große Mengen an Treibhausgasen, vor allem Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), freisetzt. Diese Emissionen sind als „Prozessemissionen“ bekannt und werden bei der chemischen Reaktion freigesetzt, die stattfindet, wenn Kalkstein erhitzt wird, um Klinker, einen wichtigen Bestandteil von Zement, herzustellen. Diese Art von Emissionen machen einen großen Teil des Ausstoßes der Industrie aus und lassen sich nur schwer vermeiden, da sie während des Produktionsprozesses entstehen.

## Innovationen im Bereich Energieeffizienz und Dekarbonisierung

Während sich die Bemühungen um eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in erster Linie auf die Zementherstellung konzentriert haben, können zusätzliche Reduzierungen erreicht werden, wenn die gesamte Wertschöpfungskette von der Zementherstellung bis zur Verwendung in Baumaterialien wie Mörtel und Beton berücksichtigt wird. CEMBUREAU, der Europäische Zementverband, ist eine Organisation, die die Interessen der Zementhersteller vertritt und eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Zementindustrie in Europa fördert. Der Verband hat eine Dekarbonisierungs-Roadmap entwickelt, die die Strategie der Branche zur Reduzierung der Kohlenstoffemissionen und zur Erreichung der Klimaneutralität beschreibt. Der Fahrplan setzt Prioritäten in den Bereichen Innovation, Investitionen und Zusammenarbeit und bietet eine Vision für den Übergang der Zementindustrie in eine kohlenstoffarme Zukunft. Die Dekarbonisierungs-Roadmap von CEMBUREAU beinhaltet einen „5C-Ansatz“, der einen kollaborativen Ansatz entlang der Wertschöpfungskette von **Clinker, Cement, Concrete, Construction, Carbonation** fördert und alle Akteure einbezieht, um die Vision einer kohlenstoffarmen Zukunft Wirklichkeit werden zu lassen. Das nachstehende Diagramm (Abbildung 2) von CEMBUREAU fasst die technischen Wege zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen im Vergleich zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors von 1990 zusammen. Entlang der Zementwertschöpfungskette (5C) müssen insgesamt 783 kg CO<sub>2</sub>/t Zement eingespart werden, um Netto-Null-Emissionen in diesem Sektor zu erreichen.

Abbildung 2: CEMBUREAU Roadmap CO<sub>2</sub>-Reduzierung entlang der Wertschöpfungskette von Zement (5Cs: Clinker, Cement, Concrete, Construction, Carbonation)



Auch wenn die gesamte Wertschöpfungskette verbessert werden muss, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen, sind einige Schritte kohlenstoffintensiver als andere. Die energieintensivste Phase der Wertschöpfungskette findet im Zementwerk statt, wo zwei entscheidende Materialien hergestellt werden: **Klinker** und **Zement**.

Einige potenzielle Maßnahmen zur Verringerung der mit der **Klinkerherstellung** verbundenen Emissionen sind die Verwendung **alternativer, kohlenstofffreier Rohstoffe** (Abfälle und Nebenprodukte aus anderen Industrien), um einen Teil des Kalksteins zu ersetzen, **Brennstoffsubstitution** (alternative

Brennstoffe, Biomasse, Wasserstoff), Erhöhung des **Wärmewirkungsgrads** (in Öfen), Verwendung **neuer Arten von Zementklinkern**, die sich chemisch unterscheiden und weniger CO<sub>2</sub> emittieren, sowie CCUS-Technologien.

Um die mit der Zementherstellung verbundenen Emissionen zu verringern, sollte der für das Mischen, Mahlen und den Transport verwendete Strom aus erneuerbaren Quellen stammen. Die **Verwendung von Zement mit niedrigem Klinkeranteil** oder von Alternativen zum Klinker ist eine weitere Möglichkeit, die mit der Zementherstellung verbundenen Emissionen zu verringern.

<sup>6</sup> RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1 Cement & Lime sector status in Europe

<sup>7</sup> Cembureau, "Activity report 2020." [Online]. Available: [www.cembureau.eu](http://www.cembureau.eu)

<sup>8</sup> N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossain, and N. A. Rahim, "A critical review on energy use and savings in the cement industries," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 4. pp. 2042–2060, May 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.01.005.

# Kalk

Kalk, auch bekannt als Branntkalk oder gebrannter Kalk, ist eine weiße oder grauweiße alkalische chemische Verbindung. Kalk wird in verschiedenen Bereichen wie Umwelt, Metallurgie, Bauwesen, Chemie/Industrie und anderen Bereichen eingesetzt. Außerdem ist Kalk hochreaktiv und kann bei unsachgemäßer Handhabung gefährlich sein.<sup>6</sup>

## Überblick über den europäischen Kalksektor

Kalkprodukte werden in Europa und weltweit in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt und sind für viele Industriezweige unentbehrlich. Von der Stahlherstellung über Baumaterialien und die chemische Industrie bis hin zu Papierzellstoff.

- Umsatz: **4,2 Milliarden €**  
Wertschöpfung: **1,4 Milliarden €**
- **15.000** direkte Arbeitsplätze
- **30.000** indirekte Arbeitsplätze

Quelle: [sublime-etn.eu](http://sublime-etn.eu)

Seine große Bedeutung und Vielseitigkeit verdankt er seiner Alkalität, seiner Fähigkeit zu reinigen und zu neutralisieren. Der durchschnittliche EU-Bürger verbraucht indirekt etwa 150 g an Kalkprodukten pro Tag.

## Energieverbrauch und THG-Emissionen

Kalk entsteht durch einen Kalzinierungsprozess. Es findet ein thermischer Zersetzungsprozess statt, bei dem Kalkstein ( $\text{CaCO}_3$ ) oder Dolomit  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$   $\text{CO}_2$  freisetzt und sich unter dem Einfluss hoher Temperaturen in Kalk ( $\text{CaO}$ ) und Dolomit ( $\text{CaMgO}_2$ ) umwandelt. Die Kalkherstellung führt zu Emissionen von Treibhausgasen, sowohl durch den Prozess selbst, als auch durch den Zement (Prozessemissionen), aber auch durch den Energiebedarf.

Der Kalzinierungsprozess ist für den größten Teil des Energieverbrauchs und der  $\text{CO}_2$ -Emissionen verantwortlich, da für die Herstellung von Kalk Temperaturen um  $1.200^\circ\text{C}$  erforderlich sind und die Aufrechterhaltung dieser Temperaturen eine erhebliche Wärmemenge erfordert. Gleichzeitig sind **68% der Gesamtemissionen ein unvermeidbares Nebenprodukt des Kalzinierungsprozesses.**

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass der größte Teil der Emissionen aus dem Prozess selbst stammt, wobei die Verwendung von Dolomitmalk als Rohmaterial zu erhöhten  $\text{CO}_2$ -Emissionen führt.

Tabelle 3: Durchschnittliche  $\text{CO}_2$ -Emissionen für Kalkprodukte (EuLA, 2012)

Emissionen	Prozess ( $\text{tCO}_2 / \text{t}$ Kalkprodukt)	Verbrennung ( $\text{tCO}_2 / \text{t}$ Kalkprodukt)	Strom ( $\text{tCO}_2 / \text{t}$ Kalkprodukt)	Gesamt ( $\text{tCO}_2 / \text{t}$ Kalkprodukt)
Kalk	0,751	0,322	0,475	1,092
Dolomitmalk	0,807	0,475		1,301

## Maßnahmen zur Verringerung der $\text{CO}_2$ -Emissionen

Die European Lime Association (EuLA) ist eine Non-Profit-Organisation mit Sitz in Brüssel, Belgien, die sich für die Interessen der Kalkindustrie in Europa einsetzt. Ihre Mitglieder kommen aus verschiedenen Ländern der Europäischen Union. Im Jahr 2020 veröffentlichte EuLA eine Dekarbonisierungs-Roadmap für die Kalkindustrie. Diese stellt den Plan der Branche zur Verringerung ihrer Treibhausgasemissionen vor, der mit den Zielen des Pariser Abkommens zum Klimawandel übereinstimmt.

Die potenziellen Maßnahmen zur  $\text{CO}_2$ -Reduzierung, die in der Dekarbonisierungs-Roadmap von EuLA genannt werden, umfassen vier Bereiche:

- **Energieeffizienz durch Brennstoffeinsparung:** Die Verbesserung der Energieeffizienz, vor allem während des Kalzinierungsschritts, ist eine wichtige Option zur Verringerung der energiebedingten Emissionen.
- **Kohlenstoffarme Quellen durch Brennstoffwechsel:** Die Brennstoffe, die für die Erzeugung der benötigten Wärme verwendet werden, sind in der Regel Erdgas und Heizöl. Die Umstellung auf kohlenstoffarme Quellen ist ein Schlüssel zur  $\text{CO}_2$ -Reduzierung.
- **CCUS:** Fast 70 % der gesamten  $\text{CO}_2$ -Emissionen der Kalkindustrie sind Prozessemissionen. Für die Erreichung von Kohlenstoffneutralität werden daher CCS- und CCU-Ansätze einen wichtigen Beitrag leisten müssen.
- **Karbonatisierung:** Die Karbonatisierung ist ein natürlicher Effekt, der mit der Verwendung von Kalk einhergeht und als Umkehrreaktion der Kalkproduktion beschrieben werden kann. Während der Lebensdauer von Produkten, die Kalk enthalten, wird  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre gebunden und Kalkstein gebildet, wodurch sich der Kalkkreislauf schließt.

# Chemie

Der Chemiesektor ist ein vielfältiger Industriezweig, der eine breite Palette chemischer Produkte herstellt. Darunter fallen Kunststoffe, Arzneimittel, Düngemittel und andere Chemikalien, die in verschiedenen Industriezweigen verwendet werden. Die Produkte des EU-Chemiesektors können in drei Hauptkategorien eingeteilt werden<sup>9</sup>:

- **Basischemikalien**, die auch als Grundstoffe bezeichnet werden, machten 2018 60,4 % des gesamten Chemieumsatzes in der EU aus und umfassen Petrochemikalien und ihre Derivate (Polymere) sowie anorganische Grundstoffe.
- **Spezialchemikalien** machten 2018 27,2 % des gesamten Chemieumsatzes in der EU aus und umfassen Bereiche wie Farben und Druckfarben, Pflanzenschutzmittel, Farbstoffe und Pigmente sowie Hilfsstoffe für die Industrie (andere Chemikalien wie Klebstoffe, ätherische Öle und Gelatine).
- **Verbrauchschemikalien** werden an Endverbraucher verkauft, z. B. Seifen und Waschmittel, sowie Parfüms und Kosmetika. Sie machten 2018 12,4 % des gesamten Chemikalienumsatzes in der EU aus.<sup>10</sup>

## Überblick über den europäischen Chemiesektor

Der Chemiesektor der EU spielt eine wichtige Rolle in der europäischen Wirtschaft und ist eine der größten chemischen Industrien weltweit. Er umfasst verschiedene Branchen wie Petrochemie, Kunststoffe, Pharmazeutika, Agrochemikalien und Spezialchemikalien. Im Jahr 2018 erwirtschaftete die EU 565 Milliarden Euro an Einnahmen aus dem Chemiesektor, wobei Deutschland und Frankreich die beiden größten Chemieproduzenten in Europa sind, gefolgt von Italien und den Niederlanden.

<sup>9</sup> RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1 –Chemical & Fertilizers Sector

<sup>10</sup> Cefic, "2020 FACTS & FIGURES of the European chemical industry".

- Die chemische Industrie ist der viertgrößte Industriezweig in der EU.
- Umsatz: **565 Milliarden €** (7,6% des verarbeitenden Gewerbes in der EU)
- **30.000 Unternehmen**  
**1,2 Millionen** direkte Arbeitsplätze  
**3,6 Millionen** indirekte Arbeitsplätze<sup>10</sup>

## Energieverbrauch und THG-Emissionen

Der Chemiesektor umfasst eine breite Palette unterschiedlicher Prozesse, die von komplexen kontinuierlichen Verfahren bis hin zu kleineren Chargenprozessen reichen.

Die Verbrennung fossiler Brennstoffe, indirekte Emissionen aus dem Stromverbrauch und Prozessemissionen (die aus Prozessen resultieren, bei denen CO<sub>2</sub> als Nebenprodukt chemischer Reaktionen entsteht), machen den Kohlenstoff-Fußabdruck des Chemiesektors aus.

Im Jahr 2017 belief sich der Brennstoff- und Stromverbrauch der chemischen Industrie in der EU, einschließlich der pharmazeutischen Industrie, auf 52,7 Millionen Tonnen Öläquivalent und Gas, wobei fast zwei Drittel des gesamten Energieverbrauchs auf Strom entfielen.<sup>10</sup>

Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur (EUA) hat die chemische Industrie in der EU, einschließlich der pharmazeutischen Industrie, im Jahr 2017 135,2 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente ausgestoßen.

Das wichtigste Treibhausgas, CO<sub>2</sub>, wurde teilweise eingeschränkt; ein Großteil des Rückgangs ist jedoch auf die Verringerung von Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O) zurückzuführen, das zweitwichtigste Treibhausgas. Der stetige Rückgang der Fluorchlorkohlenwasserstoffe ist in Abbildung 3 zu sehen.

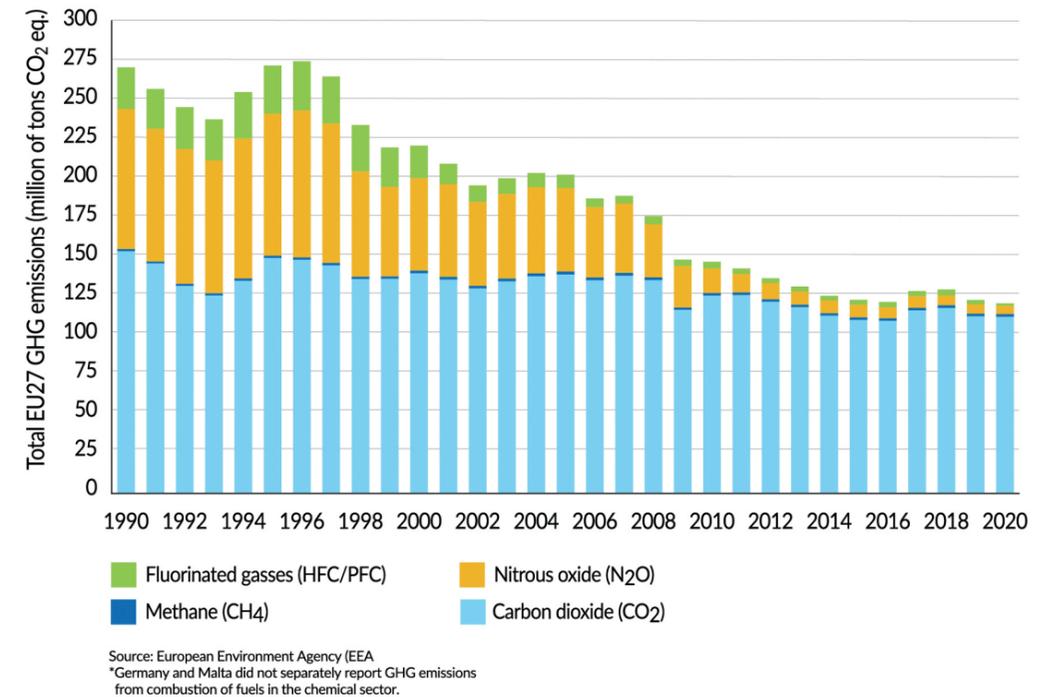


Abbildung 3: THG-Emissionen im Chemiesektor der EU, in Millionen Tonnen (CO<sub>2</sub>-Äquivalent)

Methanol, Ethylen, Chlor und Ammoniak sind aufgrund ihres großen Produktionsvolumens, aber auch ihrer Energie- und Kohlenstoffintensität die wichtigsten Chemikalien. Diese Chemikalien sind für die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Sektors verantwortlich.

## Innovationen im Bereich Energieeffizienz und Dekarbonisierung

CEFIC, die Abkürzung für European Chemical Industry Council, ist ein Wirtschaftsverband mit Sitz in Brüssel, der die Interessen der chemischen Industrie in Europa vertritt. Zu seinen Mitgliedern zählen mehr als 29.000 Unternehmen, von großen multinationalen Konzernen bis hin zu kleinen und mittleren Unternehmen. CEFIC setzt sich dafür ein, die Treibhausgasemissionen der Branche zu reduzieren und bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen.

Eine Reihe aktueller und künftiger Technologien kann die Erfolgsbilanz des europäischen Chemiesektors im Energiebereich fortsetzen und die Energieeffizienz verbessern::

- Vermeidung einer Zunahme des **Endenergiebedarfs**,
- Verringerung der Emissionen um 33 % durch **Energieeffizienz**,
- **CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Verwertung und -Speicherung (CCUS)** (25%),
- **Erneuerbarer Strom** (20%)
- **Kraftstoffwechsel** and **Maßnahmen zur Verringerung der Stickoxidemissionen** (22%)<sup>11</sup>

Neben den genannten Technologien sind Verbesserungen bei den Rohstoffen, die in der Regel auf fossilen Brennstoffen basieren, eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Treibhausgasemissionen. Dies kann durch die effiziente Nutzung vorhandener Rohstoffe, die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Rohstoffen wie Biomasse, alternative Rohstoffe und Recycling erfolgen.

<sup>11</sup> M. ; de B. J. ; L. N. ; den O. B. Stork, "Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050," 2018

# Stahl

Der Sektor der konventionellen Stahlerzeugung in Europa ist eine der wichtigsten Quellen von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Der Sektor verantwortet **etwa 4 % der gesamten europäischen CO<sub>2</sub>-Emissionen**, sowie 22 % der Industrie-Emissionen.<sup>12, 13</sup>

Mit einer Jahresproduktion von rund 1,9 Milliarden Tonnen weltweit und **139 Millionen Tonnen in der EU**, ist Stahl nach Zement und Holz das am dritthäufigsten produzierte Vollmaterial.<sup>14</sup>

## Überblick über den europäischen Stahlsektor

- Bruttowertschöpfung der EU-Industrie: **132 Milliarden Euro**.
- **2,6 Millionen** Vollzeitarbeitsplätze (Jahr 2020)<sup>14</sup>

## Energieverbrauch und THG-Emissionen

Tabelle 4 zeigt den Endenergieverbrauch bei der Eisen- und Stahlerzeugung. Der negative Energieverbrauch entspricht der in den Prozessen der Eisen- und Stahlerzeugung zurückgewonnenen Energie.

Die wichtigsten Quellen für CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Eisen- und Stahlerzeugung sind die **Rohstoffe** und die **Verbrennung von Brennstoffen**.

Bei den Prozessen des Sinterns bis zur Herstellung des endgültigen Stahlprodukts wird CO<sub>2</sub> durch Öfen, Kessel, Herde, Schmelzöfen und andere verschiedene Anlagen freigesetzt.

Von den 1,8 t CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne gewalzter Stahlspulen in einem typischen integrierten Stahlwerk entfallen 1,7 t CO<sub>2</sub> auf den Kohleeinsatz und die restlichen 0,1 t CO<sub>2</sub> auf den Kalkeinsatz.

Der größte Teil des Kohlenstoff-Fußabdrucks in der Eisen- und Stahlindustrie sind energiebezogene Emissionen.

Tabelle 4: Endenergieverbrauch in der Eisen- und Stahlerzeugung im Jahr 2015<sup>15</sup>

Verfahren	Energieverbrauch (EJ/ Jahr)	Anteil (%)
Kokskohle und Koks	24,1	70,0
Sonstige Kohle	6,1	17,6
Hochofengas und Kokereigas	-3,3	-9,6
Erdgas	2,3	6,7
Öl	0,4	1,2
Biomasse	0,1	0,4
Strom	4,0	11,8
Wärme	0,6	1,9
Gesamt	34,4	100,0

## Innovationen im Bereich Energieeffizienz und Dekarbonisierung

EUROFER, der Europäische Stahlverband, ist ein Wirtschaftsverband mit Sitz in Brüssel, der sich für die Interessen der europäischen Stahlindustrie einsetzt. Zu seinen Mitgliedern zählen über 500 Unternehmen, darunter große multinationale Konzerne sowie kleine und mittlere Unternehmen. Europa ist weltweit für seine hochentwickelte Stahlindustrie bekannt, die derzeit in Bezug auf Umwelt- und Klimabilanz weltweit führend ist. Um die Branche in eine kohlenstoffarme Zukunft zu führen, hat EUROFER im Jahr 2019 eine Dekarbonisierungs-Roadmap mit dem Titel "Low Carbon Roadmap - Pathways to Achieving a Carbon-Neutral European Steel Industry" veröffentlicht. Der Übergang zu einer kohlenstoffneutralen Zukunft erfordert beträchtliche Investitionen in neue Technologien, Energieinfrastruktur und Veränderungen beim Energieverbrauch und den Energiequellen, wobei der Zugang zu hochwertigen Materialien wie Eisenerz und Schrott ein entscheidender Faktor ist.

Um sicherzustellen, dass Europa seinen Verpflichtungen im Rahmen des Pariser Klimaabkommens nachkommt und den europäischen Stahl mit einer sauberen, kohlenstoffarmen Zukunft kompatibel macht, hat EUROFER eine Reihe von Szenarien entwickelt, die diesen notwendigen Wandel in der Branche vorantreiben.

Zusätzlich zu den von EUROFER genannten Maßnahmen besitzt die Kreislaufwirtschaft eine große Bedeutung für die Stahlindustrie, z. B. in Bezug auf Rohstoffeinsparung, Innovation, langlebige Produkte, Arbeitsplätze, Effizienz und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Recyclingquote von Stahl ist in der Branche sehr hoch und liegt bei fast 95 %, womit Stahl das am häufigsten recycelte Material ist. Die hohe Recyclingquote hat zwar vor allem wirtschaftliche Gründe, bringt aber auch andere Umweltvorteile mit sich, wie z. B. weniger Energieverbrauch und geringere Kohlenstoffemissionen.

Neben den genannten Optionen gibt es weitere Möglichkeiten zur Verringerung der Emissionen in der Stahlindustrie:

- **Verwendung von Biomasse bei der Stahlherstellung** (torrefiziertes Abfallholz, Holzkohle, Biokohle usw.)
- **Einsatz von Kohlenstoff als Reduktionsmittel** ((CCUS) könnte potenziell auf alle wichtigen Punktquellen im Stahlsektor angewendet werden.)
- **Nutzung elektrischer Energie durch auf Elektrolyse basierende Verfahren**
- **Plasma-Direkt-Stahlerzeugung**
- **Suspensions-Eisenerzeugungstechnologie**
- **Ersetzen von Kohlenstoff durch H<sub>2</sub> als Reduktionsmittel** (Wasserstoff kann direkt als Reduktionsmittel bei der Stahlherstellung verwendet werden und speziell "grüner Wasserstoff" hat daher ein hervorragendes Potenzial für die CO<sub>2</sub>-Reduktion.)

<sup>12</sup> R. Berger, "The future of steelmaking—How the European steel industry can achieve carbon neutrality," Rol. Berger GMBH, 2020.

<sup>13</sup> RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1 Steel sector status in Europe

<sup>14</sup> EUROFER, "European Steel in Figures," 2021.

<sup>15</sup> J. Kim et al., "Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options," Energy Res. Soc. Sci., vol. 89, p. 102565, 2022. [Online] <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102565>.

# Glas

Glas ist nach wie vor eines der meistverwendeten Materialien bei Herstellungs-, Bau- und Verbrauchsprozessen, das Produkte mit geringem Gewicht und Verglasungen von höchster Qualität ermöglicht.<sup>16</sup>

Die wichtigsten Erzeugnisse der Glasbranche sind **Behälterglas, Flachglas, Glasfaser, Haushaltsglas** und **Spezialglas** (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Haupterzeugnisse der Glasindustrie

Haupterzeugnisse aus Glas	Anteil an der Glasindustrie der EU	Verwendung
Behälterglas	Der größte Glassektor in der EU mit 62 % der EU-Produktion.	Verpackungsprodukte wie Flaschen und Gläser
Flachglas	Zweitgrößter Glassektor mit einem Anteil von fast 29 % an der gesamten EU-Produktion.	Wohn-, Automobil- und Gewerbebau, sowie innovative Anwendungen
Glasfaser	Die Produktion von Glasfasern aus Endlosfilamenten (CFCG) hat mit 2 % den geringsten Anteil des Sektors.	Hauptsächlich werden sie als Verbundwerkstoffe in verschiedenen Bereichen eingesetzt.
Haushaltsglas	Auf diesen Sektor entfallen etwa 4 % der gesamten europäischen Produktion.	Herstellung von Glasgeschirr, Kochgeschirr und Ziergegenständen
Spezielle Glaserzeugnisse	Sie machen nur einen geringen Anteil an der gesamten weltweiten Glasproduktion für Produkte mit hohem Mehrwert aus.	Beleuchtungsglas, Laborglas, optisches Glas und extra dünnes Glas für die Elektronikindustrie

## Überblick über den europäischen Glassektor

Obwohl der normale Betrieb der meisten Glasbranchen seit 2020 aufgrund der COVID-19-Krise unterbrochen war, war 2021 eine langsame Erholung zu verzeichnen.

- Produktion: **39,1 Millionen Tonnen** Glas in der EU (Jahr 2021)
- Die EU ist zusammen mit China und Nordamerika einer der größten Glasproduzenten der Welt
- **181.000 Beschäftigte** in der Glasindustrie in der EU-27 (Jahr 2021)

## Energieverbrauch und THG-Emissionen

Glas ist ein energieintensiver Sektor, da für die Glasherstellung extrem hohe Temperaturen erforderlich sind. Daher ist Energie einer der größten Kostenfaktoren bei der Glasherstellung. Traditionell wird bei der Glasherstellung Erdgas mit Luft verbrannt, was ein energieintensiver und umweltschädlicher Prozess ist. Infolgedessen verursacht die Glasherstellung in Europa jedes Jahr Emissionen von 22 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>.<sup>17</sup>

## Innovationen im Bereich Energieeffizienz und Dekarbonisierung

Heute entstehen die meisten Emissionen im Glassektor durch den Einsatz fossiler Brennstoffe zum Schmelzen von Rohstoffen. Die Umstellung auf eine kohlenstoffneutrale Energiequelle ist daher ein wichtiges Reduktionspotenzial.

Die Glass Alliance Europe (GAE) ist ein europäischer Verband, der sich für die Interessen der Glasindustrie einsetzt. Ihr Ziel ist es, politische Maßnahmen und Regelungen zu fördern, die das Wachstum und die Wettbewerbsfähigkeit der Branche auf europäischer Ebene unterstützen. Glass Alliance Europe erkennt die Bedeutung des europäischen Green Deals an, der darauf abzielt, die Klimaneutralität der europäischen Wirtschaft und Gesellschaft bis 2050 zu erreichen.

Glas spielt eine zentrale Rolle als Schlüsselmaterial in Sektoren mit erheblichem Potenzial zur Emissionsreduzierung, nämlich Energie, Bau und Verkehr. Als solches ist es ein wesentliches Produkt für ein kohlenstoffneutrales Europa. Darüber hinaus trägt Glas wesentlich zum Aufbau einer echten Kreislaufwirtschaft bei, da es in Behältern unendlich oft recycelt und wiederverwendet werden kann. Diese Eigenschaft trägt dazu bei, Ressourcen zu schonen und Kohlenstoffemissionen zu reduzieren.

Außerdem finden sich in der verfügbaren Literatur Empfehlungen für den Glassektor, die auf eine Emissionsreduzierung abzielen und sich mit Technologien zur Dekarbonisierung befassen (Tabelle 6). Ihre wirtschaftliche Machbarkeit und technische Durchführbarkeit müssen jedoch weiter untersucht werden.

Tabelle 6: Innovationstechnologien zur Dekarbonisierung der Glasindustrie

<b>Neuartige Technologien</b>
Verbesserung der Energieeffizienz von Brennöfen
Abwärmerückgewinnung zur Vorwärmung von Verbrennungsluft in Brennöfen
<b>Innovationen bei der Verbrennung</b>
Oxyfuel-Brennstoffe
Einführung von flüssigen Biokraftstoffen (Biodiesel und hydriertes Pflanzenöl)
<b>Innovationen zur Verringerung der Verbrennung</b>
Elektrolichtbogenöfen (EAF) anstelle von gasbefeuerten Öfen
Hybridöfen, die mit mehreren Brennstoffen und Strom betrieben werden
Nutzung von Wasserstoff zum Betrieb von Glasöfen
<b>Kreislaufwirtschaft</b>
Vermehrte Verwendung von Glasbruch zur Herstellung von neuem Glas (Abfall zu Material)
Kalzinierte Rohstoffe wie CaO als Ersatz für Karbonate zur Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen
CCUS als die potenziell kohlenstoffneutrale Technologie mit großem kurzfristigen Potenzial

<sup>17</sup> How LIFE is reducing emissions from glass production (europa.eu)

<sup>16</sup> RE4Industry Project Deliverable (2022): D3.1 Glass sector status in Europe

## 2- Lösungen im Bereich Erneuerbare Energien

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die relevanten Technologien für Erneuerbare Energien (EE), die derzeit (im Hinblick auf den Anwendungsbereich 2030) verfügbar sind und im Übergang zum Jahr 2050 für die Dekarbonisierung der Energieintensiven Industrien (EII) verfügbar sein werden.

Die Lösungen für Erneuerbare Energien werden unterteilt in Technologien, die auf der Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien beruhen, und solche, die zur Erzeugung von Wärme für verschiedene industrielle Prozesse eingesetzt werden. Die Elektrifizierung wird dank der allmählichen Senkung der Preise für Erneuerbare Energien und der Umstellung von erdgasbasierten Prozessen eine Schlüsselrolle spielen. Industrielle Prozesse, die nicht ohne Weiteres für eine Elektrifizierung in Frage kommen, werden weiterhin eine Form von erneuerbarer Wärme benötigen.

Die Technologien für Erneuerbare Energien im Rahmen von 2030 sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt.<sup>18</sup>

Tabelle 7: Erneuerbare Strom- und Wärmelösungen

Erneuerbare Stromquellen					
<b>Photovoltaik</b>	<b>Wind</b>	<b>Wasserkraft</b>	<b>Stromkaufvereinbarungen für erneuerbaren Strom</b>		
					
Erneuerbare Wärmequellen					
<b>Solar Thermie</b>	<b>Wärme-Pumpen</b>	<b>Geothermie</b>	<b>Biomasse</b>	<b>Biokraft-stoffe</b>	<b>Grüner Wasser-stoff</b>
					

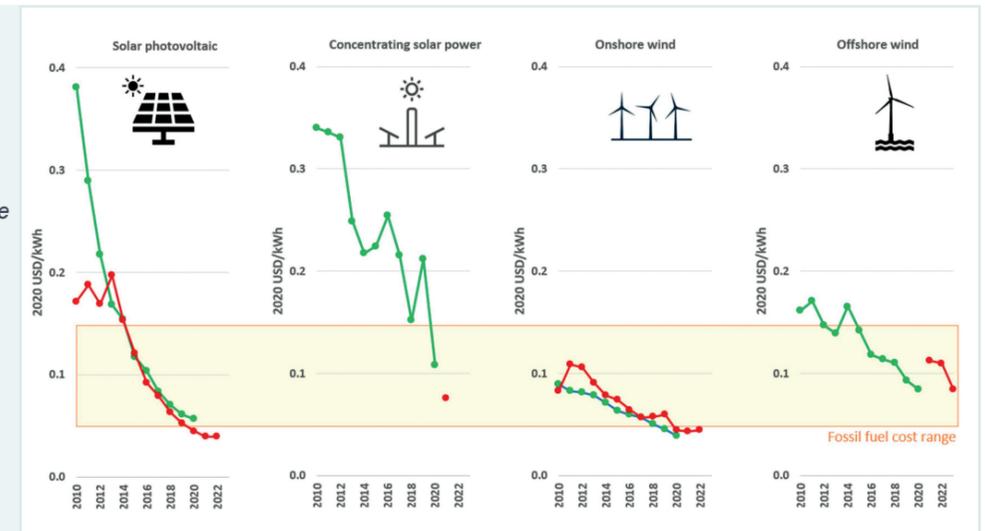
<sup>18</sup> Carmona-Martínez AA, Fresneda-Cruz A, Rueda A, Birgi O, Khawaja C, Janssen R, Davidis B, Reumerman P, Vis M, Karampinis E, Grammelis P, Jarauta-Córdoba C. Renewable Power and Heat for the Decarbonisation of Energy-Intensive Industries. Processes. 2023; 11(1):18. <https://doi.org/10.3390/pr11010018>

## Erneuerbarer Strom

Erneuerbarer Strom kann aus verschiedenen Quellen gewonnen werden: **Photovoltaik, konzentrierende Solarthermie** und **On-/Offshore-Windkraft**. Diese Technologien haben in den letzten zehn Jahren eine starke Verringerung der Stromproduktionskosten erfahren. Im Vergleich dazu waren die Betriebskosten für fossile Energieträger wie Kohlekraftwerke höher als die der Erneuerbaren Energien.

Abbildung 4 zeigt auch, dass die angegebenen Kosten für erneuerbare Technologien seit 2010 erheblich gesunken sind. Dies zeigt, dass die Wettbewerbsfähigkeit der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien und ähnlichen Technologien auf der Grundlage erneuerbarer Ressourcen, die für die Dekarbonisierung Energieintensiver Industrien benötigt werden, einen ähnlichen Trend zur Kostenreduktion aufweisen könnten.

Abbildung 4: Global gewichtete durchschnittliche Energiekosten (grün) und Auktionspreise für Stromabnahmeverträge (rot) für Solar-Photovoltaik, On-/Offshore-Windkraft und konzentrierende Solarthermie zwischen 2010 und 2023. Quelle: IRENA



Die Internationale Energieagentur (IEA) erwartet, dass die derzeitige weltweite Photovoltaik-Kapazität von 200 GW (EU-Anteil von 25 %) bis 2050 auf 3000 GW (EU-Anteil von 5 %) ansteigen wird.

Der Hauptvorteil der Erneuerbaren Energien ist ihre Flexibilität bei der Nutzung. Netzgekoppelte Anlagen erzeugen Strom für den Eigenverbrauch und der Überschuss kann in das Netz eingespeist werden. Auf der anderen Seite arbeiten netzunabhängige Anlagen in Isolation. Sie werden an abgelegenen Orten aufgestellt, um den Strombedarf zu decken. Netzunabhängige Anlagen erfordern die Installation von Batterien, um überschüssigen Strom zu speichern.

Es gibt zwei Hauptwege für die Einführung von Strom aus Erneuerbaren Energien, der entweder aus Photovoltaik, konzentrierender Solarthermie oder On-/Offshore-Windkraft erzeugt wird. Der einfachste Weg ist die **direkte Substitution von Strom aus fossilen Brennstoffen in den derzeitigen industriellen Prozessen**. Der zweite Weg ist die **Elektrifizierung der derzeitigen Prozesse, die auf einer Wärmeversorgung aus nicht erneuerbaren Brennstoffen wie Erdgas, Kohle und anderen basieren**.<sup>19</sup> Darüber hinaus decken elektrisch betriebene Technologien ein breites Temperaturspektrum ab, das von der Industrie benötigt wird,<sup>20</sup> und Anwendungen, die niedrige und mittlere Temperaturen erfordern, wie elektrische Heizkessel und Wärmepumpen zur Wärme- und Kälteversorgung, sind nicht sektorspezifisch und können daher übergreifend eingesetzt werden.<sup>18</sup>

<sup>19</sup> Lechtenbömer S, Nilsson LJ, Åhman M, Schneider C. Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. Energy. 2016;115:1623-1631. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.110>

<sup>20</sup> Madeddu S, Ueckerdt F, Pehl M, et al. The CO<sub>2</sub> reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). Environ Res Lett. 2020;15(12):124004. doi:10.1088/1748-9326/abbd02

# Erneuerbare Wärme

Regenerative Wärme kann aus verschiedenen erneuerbaren Energiequellen wie Solarthermie, Wärmepumpen, Geothermie, Biomasse, Biokraftstoffen und grünem Wasserstoff erzeugt werden.

## Solarthermie

Solarthermische Kollektoren werden zur Energieerzeugung eingesetzt, indem sie Sonnenenergie in nutzbare Wärme umwandeln. Sie absorbieren die einfallende Sonnenstrahlung, wandeln sie in Wärme um und geben diese Wärme an ein Medium (in der Regel Luft, Wasser oder Öl) ab, das durch den Kollektor fließt. Die so gesammelte Sonnenenergie wird von der zirkulierenden Flüssigkeit abgeführt, um entweder direkt genutzt oder in einem Wärmespeicher gespeichert zu werden.<sup>21</sup>

Tabelle 8: Gängige Kollektortypen und der von ihnen erreichbare Temperaturbereich

Bewegung	Kollektortyp	Absorber-Typ	Temperatur °C
Nicht-konzentrierend	Flachkollektor (FPC)	Flach	30-80 <sup>22</sup>
	Vakuumröhrenkollektor (ETC)	Flach	50-200 <sup>22</sup>
Konzentrierend (einachsige Nachführung)	Parabolrinnenkollektor (PTC)	Röhrenförmig	60-375 <sup>23</sup>
	Linearer Fresnel-Kollektor (LFC)	Röhrenförmig	60-400 <sup>24</sup>
Konzentrierend (Zwei-Achsen-Nachführung)	Parabolschüsselkollektor (PDC)	Punkt	750-1000 <sup>25</sup>
	Solarturmkraftwerk	Punkt	500-1500 <sup>26</sup>

Es gibt zwei Arten von Sonnenkollektoren: nicht konzentrierende/stationäre und konzentrierende Kollektoren. Konzentrierende Kollektoren erreichen im Vergleich zu ihren nicht konzentrierenden Pendanten ein höheres Temperaturniveau. Nicht konzentrierende Kollektoren eignen sich für Anwendungen, die niedrige (<150°C) bis mittlere (150°C - 400°C) Temperaturen erfordern. Konzentrierende Kollektoren hingegen sind für höhere Temperaturen (>400°C) geeignet. Tabelle 8 zeigt die gängigen Kollektortypen und ihren Temperaturbereich.

Nahezu alle industriellen Prozesse mit Wärmebedarf benötigen Temperaturen, die durch eine solarthermische Anlage bereitgestellt werden können. Unter den EIL hat der Chemiesektor einen hohen Anteil an Nieder- und Mitteltemperatur-Wärmebedarf in seinen Produktionsprozessen (>50%) und ist der am besten geeignete Industriesektor, in dem solarthermische Wärme gewinnbringend genutzt werden kann.

Die Auswahl eines geeigneten Sonnenkollektors hängt von mehreren Faktoren ab: Betriebstemperaturen, Wärmewirkungsgrad, Energieausbeute, Kosten, Platzbedarf, und anderem.

<sup>21</sup> Anastasovski A, Raskovic P, Guzovi'c Z, Sedić A. A Systematisation of Methods for Heat Integration of Solar Thermal Energy in Production Processes: A Review. 2020;8:410-437. doi:10.13044/j.sdewes.d7.0310

<sup>22</sup> Wang R, Ge T. Advances in Solar Heating and Cooling. Woodhead Publishing; 2016.

<sup>23</sup> Belessiotis V, Kalogirou S, Delyannis E. Thermal Solar Desalination: Methods and Systems. Elsevier; 2016.

<sup>24</sup> GmbH IS. Fresnel Collector LF-11 Datasheet.; 2021.

<sup>25</sup> Berrada A, El Mrabet R. Hybrid Energy System Models. Academic Press; 2020.

<sup>26</sup> Qazi S. Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas. Elsevier; 2016.

<sup>27</sup> Sornek K, Filipowicz M, Jasek J. The Use of Fresnel Lenses to Improve the Efficiency of Photovoltaic Modules for Building-integrated Concentrating Photovoltaic Systems. J Sustain Dev Energy, Water Environ Syst. 2018;6:415-426. doi:10.13044/j.sdewes.d6.0204

## Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe wandelt Wärme aus der Luft, dem Boden und dem Wasser in Nutzwärme um. Sie ist vielseitig einsetzbar und kann in Wohn-, Gewerbe- und Industriegebäuden verwendet werden. Mit einer Wärmepumpe kann geheizt, gekühlt und Warmwasser erzeugt werden. Diese Umwandlung erfolgt über einen Kältemittelkreislauf.

Das Kältemittel ist eine spezielle Flüssigkeit, die in einem geschlossenen Kreislauf in den vier Hauptkomponenten einer Wärmepumpe zirkuliert: Verdampfer, Kompressor, Verflüssiger und Expansionsventil. Wärmepumpen sind Geräte, die mechanische Arbeit nutzen, um Energie in Wärme umzuwandeln. Das zugrundeliegende thermodynamische Prinzip von Wärmepumpen basiert auf der Tatsache, dass die Komprimierung von Flüssigkeiten auf ein kleineres Volumen zu einer Erhöhung ihrer Temperatur führt (siehe Abbildung 5).

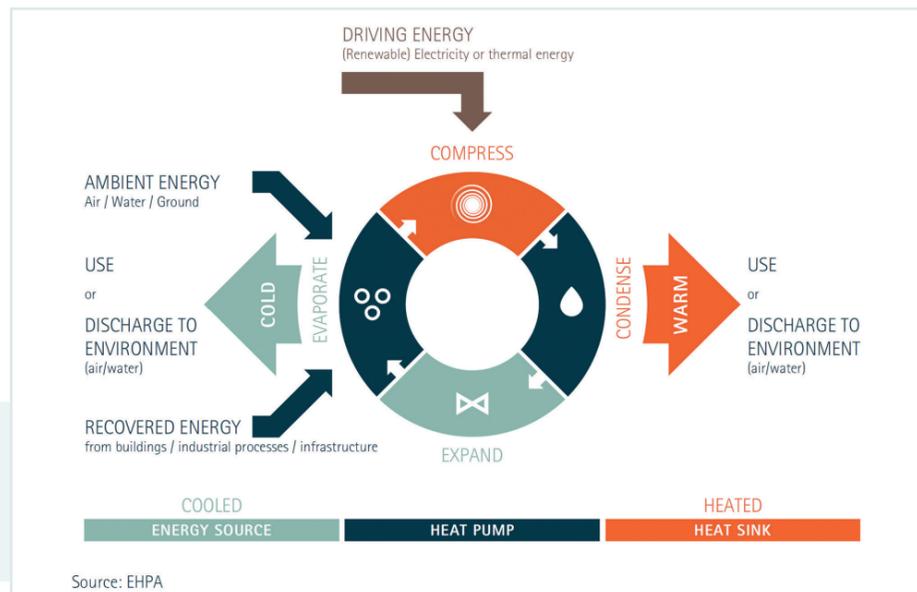


Abbildung 5: Dampfkompressionskreislauf für gleichzeitiges Heizen und Kühlen

Es gibt verschiedene Arten von Wärmepumpen für unterschiedliche Bedürfnisse und Umweltbedingungen. **Unterwasser-Wärmepumpen** nutzen eine Wasserquelle als Wärmeaustauschmedium und gelten aufgrund der hervorragenden Temperatureigenschaften von Wasser als Energieträger als hocheffizient. Diese Eigenschaft macht diese Art von Wärmepumpen besonders für Standorte mit extremen Wetterbedingungen interessant. **Luft-Wärmepumpen** hingegen werden oberirdisch installiert und nutzen die Wärme aus der Umgebungsluft als primäre Energiequelle. **Abgaswärmepumpen** sind eine weitere Art von Luftwärmepumpen, die Abwärme aus Produktionsprozessen nutzen. Da die Abwärme wärmer ist als die Umgebungsluft, ist der Prozess der Verdampfung und Kondensation bei dieser Art von Wärmepumpen effektiver. Daher sind diese Wärmepumpen im industriellen Sektor sehr gut einsetzbar.

Der Einsatz von Wärmepumpen in EILs ist aus mehreren Gründen begrenzt. Es gibt nicht genügend Hersteller von Geräten und die verfügbaren Anlagen sind nicht in der Lage, den breiten Bereich der von der Industrie benötigten Prozesstemperaturen zu liefern. Obwohl EILs einen großen Wärmebedarf von bis zu 200°C haben, bieten die meisten kommerziellen Hersteller Geräte an, die Wärme bis zu 90°C liefern können. Nur wenige Anbieter bieten Geräte an, die Wärme im Bereich von 120-165°C liefern können. Darüber hinaus haben einige laufende Projekte gezeigt, dass Wärme im Temperaturbereich von 160-200°C durch innovative Wärmepumpen bereitgestellt werden kann.<sup>28</sup>

<sup>28</sup> Zühlsdorf B, Bühler F, Bantle M, Elmegaard B. Analysis of technologies and potentials for heat pump-based process heat supply above 150 °C. Energy Convers Manag X. 2019;2:100011. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100011>

## Geothermie

Geothermische Energie wird als eine Energiequelle angesehen, die zur Dekarbonisierung der Industrie beitragen kann. Die Prognosen zeigen, dass bis 2050 etwa 100 bis 210 TWh/Jahr aus geothermischen Energieressourcen zur Verfügung stehen werden.<sup>29</sup> Auch wenn die Haupteinsatzgebiete der geothermischen Energie im Wohn- und Gewerbebereich in Form von Fernwärme liegen, sind auch Anwendungen im landwirtschaftlichen und industriellen Bereich vorgesehen.<sup>29, 30, 31</sup>

All regions in Europe show an economical potential for geothermal energy applications depending on the depth except for Iceland, and a few other European regions with a clear volcanic activity. In these regions, the potential to produce electricity from geothermal energy is limited to reservoirs at depths below 2 km (See Figure 6). However, direct geothermal applications in agricultural greenhouses or industry can still be developed with such depths.<sup>30</sup>

Die Finanzierung und Entwicklung neuer Wärmenetze wird als eine große Herausforderung für geothermische Energie angesehen. Daher könnte die Nachrüstung von Wärmenetzen die Einführung der Geothermie im Bereich der städtischen Fernwärme und auch als Energiequelle für EILs befördern.

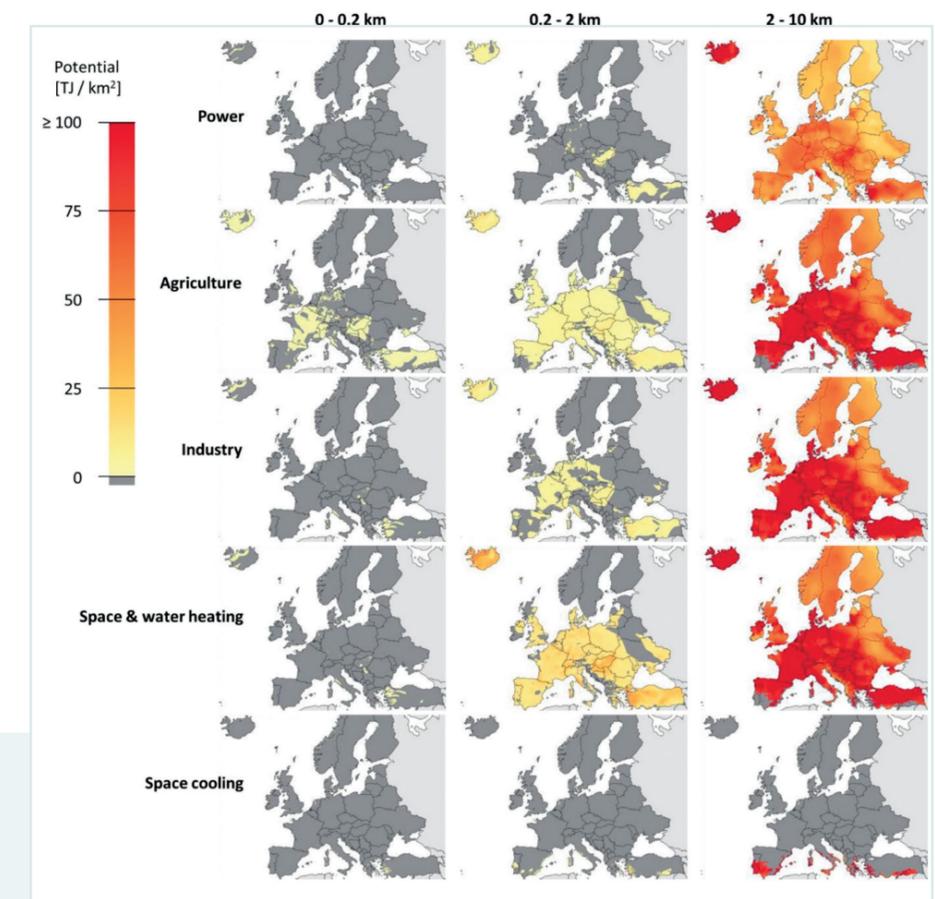


Abbildung 6: Langfristige wirtschaftliche Potenziale für verschiedene geothermische Anwendungen in Europa in drei verschiedenen Tiefenbereichen<sup>32</sup>

<sup>29</sup> Urbancl D, Trop P, Goričanec D. Geothermal heat potential-the source for heating greenhouses in Southeastern Europe. Therm Sci. 2016;20(4):1061-1071.

<sup>30</sup> Østergaard PA, Lund H. A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating. Appl Energy. 2011;88(2):479-487. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.018>

<sup>31</sup> Barkaoui A-E, Boldyryev S, Duic N, Krajacic G, Guzović Z. Appropriate integration of geothermal energy sources by Pinch approach: Case study of Croatia. Appl Energy. 2016;184:1343-1349. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.112>

<sup>32</sup> Dalla Longa F, Nogueira LP, Limberger J, Wees J-D van, van der Zwaan B. Scenarios for geothermal energy deployment in Europe. Energy. 2020;206:118060. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060>

## Biomasse

Feste Biomasse, die bei weitem der wichtigste Rohstoff (91 %) für die Erzeugung von Biowärme ist, wurde als Schlüsselbrennstoff für den Übergang zu Erneuerbaren Energien identifiziert. Die Umwandlung von Biomasse in nutzbare Energieformen kann über drei Hauptumwandlungswege erfolgen: **thermochemische**, **physikalisch-chemische** und **biochemische** Umwandlungsprozesse.

Erneuerbare Wärme kann durch thermo-chemische Umwandlungsprozesse erzeugt werden. Abbildung 7 zeigt die wichtigsten thermo-chemischen Umwandlungstechnologien, mit denen erneuerbare Wärme und erneuerbarer Strom aus fester Biomasse erzeugt werden können. Alle thermo-chemischen Umwandlungstechnologien sind, je nach verwendetem Ausgangsmaterial, in kommerziellem Maßstab verfügbar, wobei die Verbrennung stärker verbreitet ist, als alle anderen Technologien. Die Verwendung von verschiedenartigen Biomasserohstoffen ist einer der Hauptvorteile dieser Technologien. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mit Biomasse ununterbrochen Energie erzeugt werden kann, was es ermöglicht, die benötigten Energiemengen bei Bedarf zu erzeugen.

Im Jahr 2018 entfielen auf den Zellstoff- und Papiersektor sowie auf die Holz- und Holzzeugindustrie zusammen 81 % der in der EU für den Energieverbrauch genutzten Biomasse. Dicht dahinter folgen die Industrien für nichtmetallische Mineralien wie Glas, Keramik und Zement, die mengenmäßig die drittgrößten Nutzer von Biomasse sind. Die Sektoren Chemie und Petrochemie, Eisen und Stahl, sowie Buntmetalle nutzten dagegen nur 0,64 %, 0,04 % bzw. 0,03 % Biomasse für ihren Energieverbrauch.<sup>33</sup>

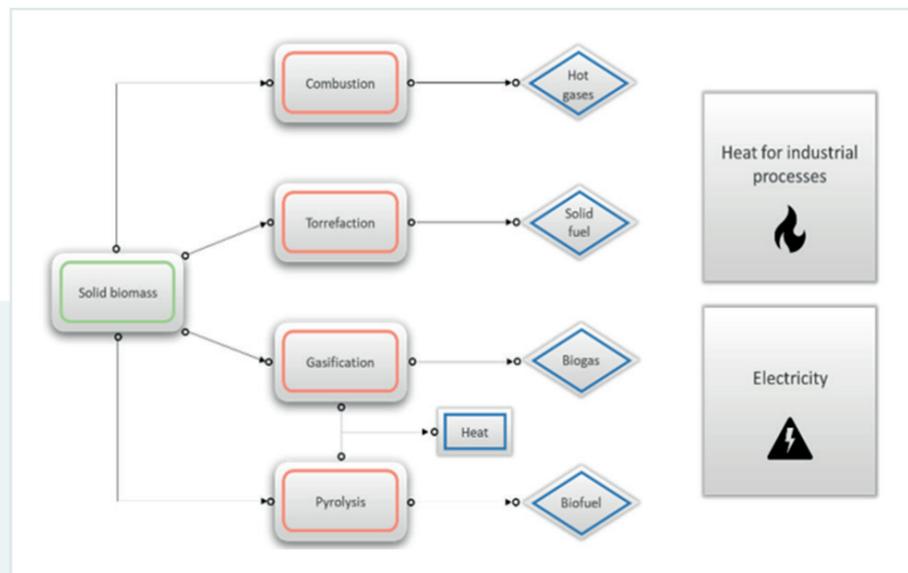


Abbildung 7: Wichtige thermo-chemische Umwandlungstechnologien für Biomasse, eigener Entwurf, basierend auf <sup>34, 35, 36</sup>

## Biokraftstoffe

Biokraftstoffe sind Kraftstoffe, die durch die Umwandlung von Biomasse entweder in eine flüssige (am häufigsten), feste oder gasförmige Form des Kraftstoffs umgewandelt werden.<sup>37</sup> Die für die Herstellung von Biokraftstoffen verwendeten Rohstoffe spielen eine wichtige Rolle bei der Einstufung in konventionelle (Biokraftstoffe der 1. Generation) und fortschrittliche Biokraftstoffe (Biokraftstoffe der 2. Generation).<sup>38</sup> Während konventionelle Biokraftstoffe aus essbaren und landverbrauchenden Rohstoffen hergestellt werden, werden für fortschrittliche Biokraftstoffe organische Rohstoffe, sowie Rohstoffe verwendet, die nicht für die Ernährung bestimmt sind.<sup>39</sup>

Obwohl die meisten der kommerzialisierten Biokraftstoffe wie Biodiesel und Bioethanol im Verkehrssektor verwendet werden<sup>40</sup>, ist ihr Einsatz in energieintensiven Industrien wie der Zement-, Eisen-, Keramik- und Chemiebranche nicht sehr verbreitet. Diese Sektoren sind nach wie vor auf die Verwendung herkömmlicher fossiler Brennstoffe angewiesen, die durch Strom aus erneuerbaren Energiequellen und Biomethan ersetzt werden könnten, wie z. B. Strom aus Verbrennungskohlenstoff und Erdgas für die Wärmeerzeugung. Die Ähnlichkeiten zwischen der Zusammensetzung von Erdgas und Biomethan sind sehr groß; daher könnte die Verbrennung von Erdgas idealerweise durch dieses erneuerbare Gas ersetzt werden.<sup>41</sup> Die Verwendung von Biomethan in der Industrie erfordert dabei keine Änderung der derzeitigen industriellen Verfahren (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Vergleich von Erdgas, Biogas und Biomethan

Verbindung	Erdgas (%) <sup>42</sup>	Biogas (%) <sup>43</sup>	Biomethan (%) <sup>44</sup>
Methan	87,0-98,0	50-75	>90
Ethan	1,5-9,0	N.A.	N.A.
Butan	0,1-1,5	N.A.	N.A.
Pentan	<0,4	N.A.	N.A.
N <sub>2</sub>	5,5	0-10	N.A.
CO	0,05-1,0	25-50	N.A.
O <sub>2</sub>	<0,1	0-2	N.A.
H <sub>2</sub>	N.A.	0-1	<5

<sup>33</sup> Calderón C, Avagianos I, Jossart J-M. Bioheat Statistical Report.; 2020.

<sup>34</sup> McKendry P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Bioresour Technol. 2002;83(1):47-54. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)

<sup>35</sup> Islas J, Manzini F, Masera O, Vargas V. Chapter Four - Solid Biomass to Heat and Power. In: Lago C, Caldés N, Lechón YBT-TR of B in the B, eds. Academic Press; 2019:145-177. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813056-8.00004-2>

<sup>36</sup> Malico I, Nepomuceno Pereira R, Gonçalves AC, Sousa AMO. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. Renew Sustain Energy Rev. 2019;112:960-977. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022>

<sup>37</sup> Suurs RAA, Hekkert MP. Competition between first and second generation technologies: Lessons from the formation of a biofuels innovation system in the Netherlands. Energy. 2009;34(5):669-679. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.002>

<sup>38</sup> Heyne S, Harvey S. Assessment of the energy and economic performance of second generation biofuel production processes using energy market scenarios. Appl Energy. 2013;101:203-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.034>

<sup>39</sup> IRENA. Advanced Biofuels, What Holds Them Back?; 2019. <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Advanced-biofuels-What-holds-them-back>

<sup>40</sup> Ajanovic A, Haas R. On the future prospects and limits of biofuels in Brazil, the US and EU. Appl Energy. 2014;135:730-737. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.001>

Trotz der technischen Machbarkeit von Biomethan ist eine der Herausforderungen bei seiner Umsetzung eng mit seiner Verfügbarkeit verbunden.<sup>45</sup> Es wird erwartet, dass Biomethan bis 2030 nur etwa 8 % des gesamten Erdgasverbrauchs in der EU ersetzen wird.<sup>46</sup>

## Grüner Wasserstoff

Wasserstoff ist ein Energieträger und kann aus fossilen Brennstoffen und Biomasse, aus Wasser oder aus einer Mischung von beidem hergestellt werden. Der Markt für Wasserstoff ist gut etabliert, wobei der größte Teil davon im Chemiesektor verbraucht wird. Gegenwärtig stammen etwa 95 % der weltweiten Wasserstoffproduktion aus fossilen Rohstoffen.

Wasserstoff kann durch eine Vielzahl von Verfahren hergestellt werden, und zur Erleichterung der Diskussion hat sich eine Farbcode-Nomenklatur eingebürgert (siehe Abbildung 8). Wasserstoff gilt als erneuerbar oder umweltfreundlich, wenn die Treibhausgasemissionen des Produktionsprozesses über den gesamten Lebenszyklus hinweg gegen Null gehen. Die gängigste Art der Herstellung von grünem Wasserstoff ist die Elektrolyse von Wasser (in einem Elektrolyseur, der mit Strom betrieben wird), wobei der Strom aus erneuerbaren Quellen stammt, aber er kann auch auf anderen Wegen hergestellt werden. Abbildung 9 zeigt diese verschiedenen Wege auf der Grundlage der drei Ausgangsstoffe, die für die Wasserstoffherzeugung verwendet werden können: **Strom aus erneuerbaren Energiequellen, Biomasse** und **Biogas** sowie **Sonneneinstrahlung**.

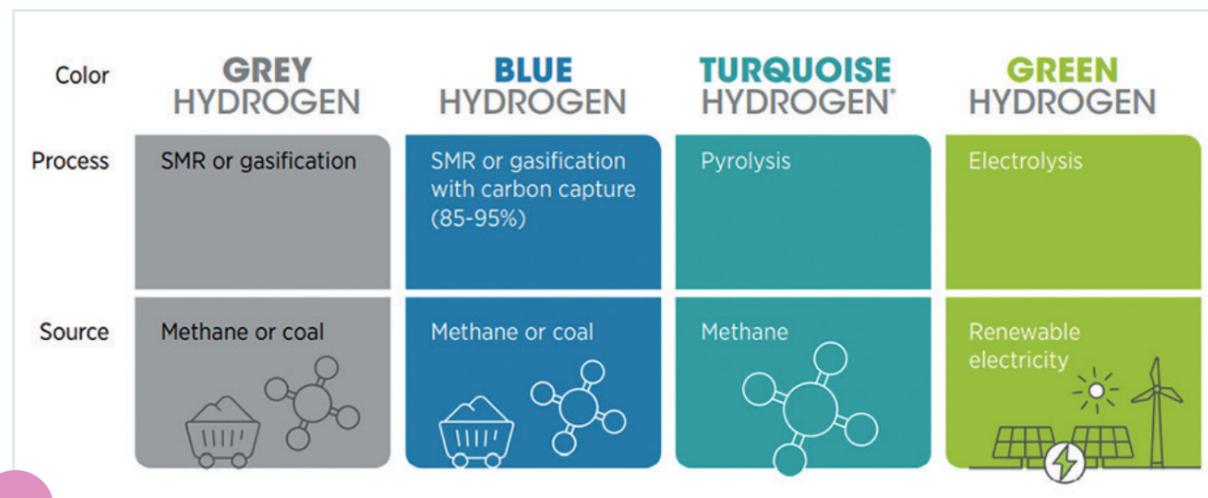


Abbildung 8: Die Farben des Wasserstoffs<sup>47</sup>

Die Dampfreformierung von Biomethan/Biogas mit oder ohne Abscheidung und Nutzung/Speicherung von Kohlenstoff ist neben der Elektrolyse mit ALK-Elektrolyseuren eine ausgereifte und gut etablierte Technologie. Weniger ausgereifte Verfahren sind Biomassevergasung und -pyrolyse, thermochemische Wasserspaltung, Photokatalyse, Vergasung von Biomasse mit überkritischem Wasser, kombinierte Dunkelfermentation und anaerobe Vergärung.

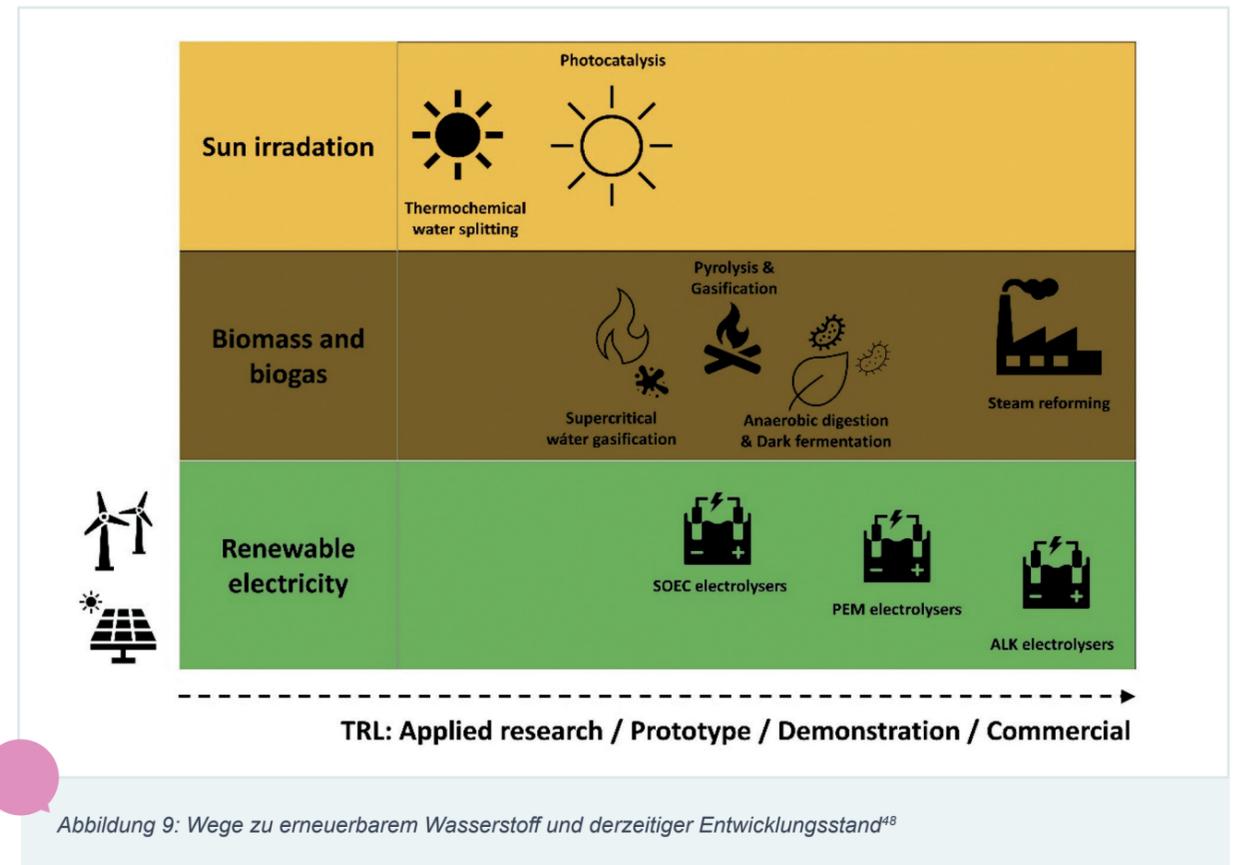


Abbildung 9: Wege zu erneuerbarem Wasserstoff und derzeitiger Entwicklungsstand<sup>48</sup>

Derzeit gibt es keine nennenswerte Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Quellen. Grüner Wasserstoff ist bisher auf Demonstrationsprojekte<sup>49</sup> beschränkt, dürfte sich aber in den kommenden Jahren weiterentwickeln.

In den Industriesegmente mit geringer und mittlerer Wärmeleistung ist die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen laut dem Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCHJU), einer öffentlich-privaten Partnerschaft, die sich mit der Erforschung der Wasserstofftechnologie beschäftigt, der wichtigste Weg zur Dekarbonisierung von Industrieprozessen.<sup>50</sup> Für Industrieprozesse im Segment mit hoher Wärmeleistung kann Wasserstoff Vorteile bieten, da er in der Lage ist, mit ähnlichen Prozessanordnungen wie heute hohe Temperaturen zu erzeugen. Neben der Verwendung für hochwertige Wärmeprozesse kann grüner Wasserstoff auch für die Herstellung von Chemikalien und synthetischen Brennstoffen sowie als Reduktionsmittel (Stahlindustrie) verwendet werden.<sup>18</sup>

<sup>48</sup> IRENA. Hydrogen from Renewable Power, Technology Outlook for the Energy Transition.; 2018. [https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2018/sep/irena\\_hydrogen\\_from\\_renewable\\_power\\_2018.pdf](https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2018/sep/irena_hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf)

<sup>49</sup> IRENA. Hydrogen: A Renewable Energy Perspective.; 2019. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA\\_Hydrogen\\_2019.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf)

<sup>50</sup> FCHJU FC and HJU. Hydrogen Roadmap Europe – A Sustainable Pathway for the European Energy Transition.; 2019. [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen\\_Roadmap\\_Europe\\_Report.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen_Roadmap_Europe_Report.pdf)

# 3-

## Erfolgsbeispiele für die Integration Erneuerbarer Energien in EIs

Es gibt erfolgreiche Beispiele für die Integration Erneuerbarer Energien in Energieintensive Industrien. In diesem Kapitel werden fünf Erfolgsbeispiele vorgestellt, die verschiedene Dekarbonisierungsmaßnahmen in Spanien, Griechenland, Belgien und Deutschland eingeführt haben. Die erfolgreichen Unternehmen sind in den Sektoren Stahl (ArcelorMittal, Ebroacero), Zement (Heracles, Heidelberg Materials) und Glas (Verallia) tätig und dienen als gutes Beispiel für andere Akteure in der Branche.

Table 10: Überblick über RE4Industry Fallstudien

Fallstudie	Wichtige Informationen	Maßnahmen zur Dekarbonisierung
<b>ArcelorMittal</b>	<b>Zielsetzung:</b> Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen um 3,9 Mio. t/Jahr bis 2030	<b>Windenergie:</b> 12 Windturbinen, Rotordurchmesser 162 m, Höhe 230 m, Kapazität 6 MW/Turbine. Energieerzeugung: 45 GWh/Jahr. Vermiedene CO <sub>2</sub> Emissionen: 11.225 t/Jahr <b>Solarenergie:</b> mehr als 27.000 Solarzellen, seit 2019, Viertgrößte Park in Belgien mit einer Fläche von 100.000 Quadratmetern, Energieproduktion: 10 GWh/Jahr
<b>Ebroacero</b>	<b>Zielsetzung:</b> Verringerung der CO <sub>2</sub> -Emissionen um 46,81 t/Jahr <b>Derzeitige Emissionen bei Ebroacero:</b> 936,18 tCO <sub>2</sub> -Äquivalent	<b>Wichtigste Maßnahme im Jahr 2021:</b> Vereinbarung mit Solarfarm über die <b>installation von PV-Solarzellen. Erstes Projektziel:</b> Aufbau von 186,84 Wp erneuerbaren Stroms für den Eigenverbrauch. <b>Stromerzeugung:</b> ~207.254 kWh/Jahr, 4-5% des gesamten Stromverbrauchs <b>Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen:</b> 46,81 tCO <sub>2</sub> -Äquivalent
<b>HERACLES</b>	Strategische Ziele des Unternehmens: Senkung der gesamten Brutto-CO <sub>2</sub> -Emissionen von 2,103 kt of CO <sub>2</sub> (2019) auf 1,522 kt CO <sub>2</sub> (2030) Verstärkte Substitution von fossilen Brennstoffen durch <b>alternative Brennstoffe (50 % bis 2023)</b>	Die im Zementwerk Milaki angewandte EE-Technologie basiert auf dem Konzept der gemeinsamen Verwertung und dem gleichzeitigen Recycling von mineralischen Stoffen und Energierückgewinnung bei der Zementherstellung. Das Werk verbrennt Biomasse, Solid Recovered Fuel (SRF) und getrockneten Klärschlamm gemeinsam.
<b>Verallia</b>	<b>Ziel:</b> Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emissionen um 46% bis 2030 (Scopes 1 & 2)	Verallia investiert in die Umstellung der an seinen Standorten eingesetzten Technologien, Ressourcen und Industrieanlagen und will seine CO <sub>2</sub> -Emissionen bis 2030 um 46% reduzieren (Scopes 1 und 2). Im Jahr 2021 beschloss Verallia außerdem, sich zu einem Ziel für die Reduzierung der CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Scope 3 zu verpflichten, das in Zusammenarbeit mit seinen Lieferanten erreicht werden soll.
<b>Witnica Solar Park</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Górzdzke:</b> 2.73 Mio. Tonnen (2018) <b>Goradze Cement SA, Ziel:</b> Klimaneutraler Beton bis 2050 und Reduzierung der spezifischen Netto- CO <sub>2</sub> -Emissionen auf unter 525 kg pro Tonne zementbasiertem Material	Die Installation von 159.856 PV-Paneeelen führt zu einer Verringerung der CO <sub>2</sub> Emissionen um 63.000 t und zur Erzeugung von 68 GWh Strom aus erneuerbaren Energiequellen pro Jahr. Etwa 2.500 Haushalte können mit dem grünen Strom aus dem Solarpark versorgt werden.

## ArcelorMittal Stahlwerk Gent



ArcelorMittal

ArcelorMittal Belgien wurde im Rahmen des RE4Industry-Projekts als einer der Erfolgsbeispiele ausgewählt, da die Industrie große Anstrengungen unternommen hat, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Energiequellen (EE) und durch Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -verwertung (CCU) zu reduzieren.



Abbildung 10: Windturbinen und Sonnenkollektoren im ArcelorMittal-Werk in Gent

Um die Ziele für 2030 zu erreichen, werden am Standort Gent ein Werk für direktreduziertes Eisen (DRI) mit einer Kapazität von 2,5 Millionen Tonnen und ein Elektrolichtbogenofen (EAF) neben dem hochmodernen holz- und kunststoffbefeuerten Hochofen in Betrieb genommen (Horizont 2020-Projekt Torero).<sup>51</sup>

Darüber hinaus fördert das Projekt Carbalyst<sup>52</sup>/Steelanol<sup>53</sup> CCU durch die biologische Umwandlung von Abgasen aus Hochöfen zu Bioethanol, das als chemischer Rohstoff oder zur Nutzung als Flüssigbrennstoff verwendet werden kann.

Drei Windturbinen wurden bis Ende 2022 aufgestellt, um die Nutzung der Windenergie zu fördern. Außerdem wurde die Installation von mehr als 27.000 Solarzellen auf dem Dach von ArcelorMittal in Gent abgeschlossen, dem größten Solardach in Belgien. ArcelorMittal besitzt derzeit den viertgrößten Solarpark und das größte Solardach in Belgien.

Zuletzt haben ArcelorMittal Belgien und Dow Benelux Versuche mit einer neuen Pilotanlage auf dem Gelände von ArcelorMittal in Gent durchgeführt, die CO<sub>2</sub> und Kohlenmonoxid (CO) aus den heißen Rauchgasen der Stahlproduktion abscheidet. Insgesamt führt dies zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 3 Millionen Tonnen pro Jahr (im Vergleich zu 2018) und gilt als wichtiger Schritt zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen bis 2050. Die vorgesehene Emissionsreduzierung leistet auch einen großen Beitrag zu dem ehrgeizigen Ziel des Unternehmens, die Kohlenstoffemissionen bis 2030 um 3,9 Millionen Tonnen pro Jahr zu reduzieren.<sup>54</sup>

<sup>51</sup> Torero - fueling a sustainable future

<sup>52</sup> Carbalyst®: Capturing and re-using our carbon-rich waste gases to make valuable chemical products | ArcelorMittal

<sup>53</sup> Home | Steelanol

<sup>54</sup> RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: ArcelorMittal Ghent steel plan

## Stromerzeugung mittels Photovoltaik in der Stahlindustrie – Ebroacero (Zaragoza, Spanien)



Der europäische Stahlsektor steht aufgrund seiner CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch seine energie- und ressourcenintensiven Prozesse entstehen, unter Druck. Im Jahr 2018 veröffentlichte die Europäische Kommission ihre langfristige Klimaschutzstrategie mit dem Ziel, Europa bis 2050 zu einer Region ohne Treibhausgasemissionen zu machen. Der Sektor der konventionellen Stahlerzeugung in Europa ist eine der größten Quellen von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

In diesem Zusammenhang unterzeichnete Ebroacero im Jahr 2021 eine Vereinbarung mit einer Solarfarm über die Installation von Photovoltaik-Solarzellen in seinem Werk in Zaragoza.

Diese Maßnahme garantiert Ebroacero eine Gesamterzeugung von Strom vor Ort von etwa 4 bis 5 %. Es ist geplant, diese Menge vollständig in den eigenen Anlagen zu verbrauchen und keine Überschüsse in das Netz einzuspeisen.



Abbildung 11: Photovoltaikanwendungen in der Stahlindustrie Quelle: Ebroacero

Die Gesamtinvestition beläuft sich auf ca. 150.000 € und zielt darauf ab, den Kauf von extern erzeugtem Strom zu ersetzen.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse eine Gesamteinsparung von 29,4 Tonnen Erdgas, was 86,33 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. entspricht.

Die Installation von Photovoltaikanlagen trägt dazu bei, die Scope II Emissionen zu reduzieren. Die derzeitigen Emissionen von Ebroacero belaufen sich auf etwa 936,18 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Die neue Photovoltaikanlage leistet die Erzeugung von etwa 207.254 kWh/Jahr aus erneuerbaren Quellen, was 4-5 % des gesamten Stromverbrauchs, rund 46,81 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. entspricht.<sup>55</sup>

## Mitverwertung von Biomasse in der Zementindustrie / Das Zementwerk Milaki von HERACLES-Holcim



Die Zementherstellung ist ein energieintensiver Prozess, da die Rohstoffe auf eine hohe Temperatur (etwa 1450°C) erhitzt werden müssen. In Europa, wo die Zementindustrie auf dem neuesten Stand ist, und bereits modernste Technologie einsetzt, werden etwa 3.300 MJ thermische Energie benötigt, um eine Tonne Klinker herzustellen. Daher sind die Brennstoffkosten für die Erzeugung dieser thermischen Energie ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Zementherstellung.

Im Jahr 2020 hat HERACLES - ein Mitglied der Holcim-Gruppe und einer der größten Zementhersteller Griechenlands - ein innovatives Projekt zur Mitverwertung von Biomasse für die Zementherstellung in seinen Anlagen im Zementwerk Milaki auf der Insel Euböa konzipiert und umgesetzt.

Ein wichtiger Bestandteil der HERACLES-Strategie zum Klimawandel ist die Substitution fossiler Brennstoffe durch alternative Brennstoffe, die den ökologischen Fußabdruck des Unternehmens verringern und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der Zementfabrik Milaki und deren Produkte erhöhen. Zu den strategischen Zielen des Unternehmens im Bereich Energie und Klima gehören insbesondere:

- Senkung der gesamten Brutto-CO<sub>2</sub>-Emissionen (Scope 1) auf 1.522 kt CO<sub>2</sub> bis 2030. Zum Vergleich: Im Jahr 2019 wurden 2.103 kt CO<sub>2</sub> emittiert.
- Erhöhung der Substitution von fossilen Brennstoffen durch alternative Brennstoffe auf 50 % bis 2023. Die Einführung von alternativen Brennstoffen in den Zementwerken von HERACLES ist ein schrittweiser Prozess. Die Genehmigungsverfahren für die Verwendung alternativer Brennstoffe begannen 2009, während ihre allmähliche Einführung in den Produktionsprozess seit 2013 besteht. Im Jahr 2020 verwendete HERACLES 130.000 Tonnen alternativer Brennstoffe für die thermische Energieerzeugung, was 27,7 % des gesamten Brennstoffeinsatzes entspricht. Dadurch werden etwa 85.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart und die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Unternehmens um 7 % reduziert.

Um die genannten Ziele zu erreichen, hat das Unternehmen eine Gesamtinvestition von 2 Mio. EUR getätigt, mit der feste fossile Brennstoffe (z. B. Petrolkoks), die bei der Zementherstellung verwendet werden, durch alternative Biomassebrennstoffe ersetzt werden. Es wird erwartet, dass diese Substitution zu einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 70.000 Tonnen pro Jahr führt.

**Etwa 75.000 Tonnen Biomasse pro Jahr** - hauptsächlich Gartenabfälle und andere landwirtschaftliche Reststoffe - können durch diese Investition verwertet werden, was zur Förderung der Grundsätze der Kreislaufwirtschaft und zur Verringerung der zu deponierenden Abfallmenge beiträgt.



Abbildung 12: Biomasselager (links) und Nahaufnahme (rechts)

<sup>55</sup> RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: Electrical generation in-situ by means of photovoltaics in the steel industry – Ebroacero (Zaragoza, Spain)

<sup>56</sup> RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: Biomass co-processing in the cement industry The Milaki Cement Plant of HERACLES-Holcim

## Einführung der Mitverbrennung von Biokraftstoffen in Öfen der Glasindustrie Verallia Spain S.A (Zaragoza)



Die Glasindustrie ist eine energieintensive Branche, da die Rohstoffe auf hohe Temperaturen (ca. 1600 oC) erhitzt werden müssen, um Glasbehälter, Fasern oder Flachglasscheiben zu schmelzen, zu formen, zu beschichten und zu kühlen.

Im Jahr 2020 beschloss Verallia Spain S.A., eine spanische Tochtergesellschaft des führenden Glasherstellers, die Einführung von Innovationen in ihren Prozessen, um die unternehmerischen Strategien zur Dekarbonisierung in ihren Anlagen in Zaragoza zu verbessern.

Verallia hat die Mitverbrennung von Biobrennstoffen in seinen Öfen als Schlüssel für die Substitution von nicht erneuerbaren flüssigen Brennstoffen erkannt. In diesem Zusammenhang betreibt das Werk in Zaragoza (Spanien) bereits

einen seiner Öfen mit einer Mischung von Erdgas und Biomethan (10 Gew-%) und senkt so die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Gruppe beabsichtigt, erneuerbare Energien (insbesondere Biokraftstoffe), sowie die Einführung alternativer Lösungen zum Straßenverkehr (Schienentransport) weiter auszubauen.

In der Champagne setzt Verallia Biokraftstoff aus Raps ein, wodurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs in der Champagne um 60 % und die Feinstaubemissionen um 80 %, im Vergleich zur Verwendung von Dieselmotoren, reduziert werden. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 2000 t/Monat und einer Substitution durch Biokraftstoff von etwa 10 % führt dies zu einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von 395,6 t CO<sub>2</sub>/Monat.<sup>57</sup>



Abbildung 13: Mit Biokraftstoff aus Raps betriebener LKW in der Region Champagne  
Quelle: Verallia

## Solar PV-Nutzung (PPA) im Solarpark Witnica (Polen)



BayWa r.e. - ein weltweit führender Entwickler, Dienstleister, Verteiler und Anbieter von Energielösungen im Bereich der Erneuerbaren Energien - und die polnische Tochtergesellschaft von Heidelberg Materials, Górażdże Cement, haben 2021 einen virtuellen Stromabnahmevertrag (VPPA) mit der Dauer von 10 Jahren für den Solarpark Witnica in Polen unterzeichnet. Die Unterzeichnung des Vertrags für das Projekt in Witnica ist ein wichtiger Schritt für Górażdże in Richtung Kohlenstoffneutralität bei den Scope-2-Emissionen. Die vertraglich vereinbarte Kapazität wird etwa 10 % des Jahresverbrauchs von Heidelberg Materials abdecken.



Abbildung 14:  
Luftbild des Solarparks Witnica, Quelle: ceenergynews

Der Solarpark ist an das polnische Stromnetz angeschlossen und wird das Unternehmen bis 2031 mit grünem Strom versorgen.

Witnica ist derzeit der größte Solarpark in Polen, mit einer Kapazität von 64,6 MWp. Gleichzeitig ist er der erste ohne öffentliche Förderung betriebene Solarpark, dessen Strom über einen langfristigen VPPA vermarktet wird. BayWa r.e. hofft daher, dass diese Kooperation den Weg für weitere VPPAs in der Region ebnen wird und betont, dass dieses Projekt den kostengünstigsten Ökostrom im ganzen Land liefern wird. In diesem Zusammenhang wurden durch den Abnehmer Heidelberg Materials mehr als 63.000 tCO<sub>2</sub>-

Emissionsreduzierung erreicht und 68 GWh Strom werden jährlich aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt.

Darüber hinaus ist der Solarpark, der so viel Ökostrom produzieren wird, dass er das Äquivalent von etwa 22.500 Haushalten versorgt, das bei weitem größte Solarprojekt in Polen.

Im August 2021 wurde der Solarpark an die Alternus Energy Group verkauft. Als paneuropäischer unabhängiger Stromerzeuger wird die BayWa r.e. der Alternus Energy Group weiterhin ihre Betriebs- und Wartungsleistungen am Standort Witnica zur Verfügung stellen.<sup>58</sup>

<sup>57</sup> RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: Biofuel co-firing implementation in furnaces of glass industry Verallia Spain S.A (Zaragoza)

<sup>58</sup> RE4Industry Project: D3.3 Success cases of RE integration Case study: Solar PV Usage (PPA) in the Witnica Solar Park/ Poland

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die entwickelten Fallstudien der drei Energieintensiven Industrien, die Teil des Projektkonsortiums sind. Ziel ist es, spezifische Lösungen und Marktvorteile im Rahmen einer langfristigen Strategie zur Integration Erneuerbarer Energien und zur Dekarbonisierung aufzuzeigen.

Während des RE4Industry Projekts wurde ein Dialog zwischen den für die einzelnen Fallstudien verantwortlichen technischen Partnern (CIRCE, BTG und CERTH) und den Gastgebern der Fallstudien (SIDENOR, CORBION und MYTILINEOS) geführt, um zunächst deren Bedürfnisse und Erwartungen herauszufinden. Nachdem die für jeden Fall geeigneten Technologien der Erneuerbaren Energien bewertet wurden, wurde die endgültige Entscheidung, welche Technologie integriert werden soll, gemeinsam diskutiert.

Mytilineos

Corbion

Sidenor

Quelle: EUTL-Daten, CE Delft-Berechnungen. \* Vorläufige Daten BTA

Abbildung: CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieintensiven Industrien im EU-EHS, EU27, 2008-2018

## Mytilineos

MYTILINEOS ist ein griechisches Unternehmen, das im Industrie- und Energiesektor, sowohl in Griechenland als auch weltweit, tätig ist. Ursprünglich wurde MYTILINEOS 1908 als kleines, in Familienbesitz befindliches Unternehmen der metallurgischen Industrie in Piräus gegründet. 1990 wurde die MYTILINEOS-Gruppe gegründet und 2017 konsolidierte sich das Unternehmen als Geschäftseinheit mit einem Umsatz von 2,26 Milliarden Euro und rund 3850 Mitarbeitern.



Abbildung 15:  
Hauptblöcke  
der AoG-  
Anlage und der  
erdgasbefeuerten  
KWK-Anlage des  
Unternehmens

Diese RE4Industry-Fallstudie befasst sich mit dem Werk von Aluminium of Greece (AoG), das Teil des Geschäftsbereichs Metallurgie von MYTILINEOS ist. AoG ist der größte vertikal integrierte Aluminiumoxid- und Aluminiumhersteller in der Europäischen Union mit einer jährlichen Produktionskapazität von 900 kt Aluminiumoxid und 222 kt Aluminiumprodukten (192 kt Primäraluminium + 30 kt recycelte Fraktionen).

**Es wurden vier potenzielle Lösungen ermittelt, die als ausgereift genug für einen Einsatz bis 2030 gelten und daher für eine weitere Analyse in Betracht kommen.**

- Die Elektrifizierung der Aluminium-Warmhalteöfen hat das Potenzial, eine Emissionsminderung von bis zu 26.500 tCO<sub>2</sub> zu erreichen.
- Biomethan aus anaerober Vergärung kann ein "virtueller" Ersatz für den derzeitigen Erdgasverbrauch sein.
- Synthesegas aus der Vergasung von Biomasse wird als potenzieller Ersatz für das bei der Kalzinierung von Aluminiumoxid verwendete Erdgas angesehen.
- Grüner Wasserstoff wird langfristig als die vielversprechendste Option gesehen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Lösung wird allerdings erst in einigen Jahren erwartet.<sup>59</sup>

<sup>59</sup> RE4Industry Project: D4.2 – Initial vision document of current and future energy needs and solutions

# Corbion

Corbion ist Weltmarktführer bei Milchsäure und ihren Derivaten und ein führender Anbieter von Emulgatoren, funktionalen Enzymmischungen, Mineralien, Vitaminen und Algenbestandteilen. Corbion vermarktet seine Produkte über ein weltweites Netz von Vertriebsbüros und Händlern und verfügt über eine globale Lieferkette mit Produktionsstätten in den USA, Thailand, Brasilien, den Niederlanden und Spanien. Im Rahmen der RE4Industry-Fallstudie wird die Integration Erneuerbarer Energien am Standort von Corbion in Gorinchem, Niederlande, untersucht.



Abbildung 16: Standort des Corbion-Hauptsitzes, der Produktionsstandorte, Vertriebsniederlassungen und Innovationszentren

In Anbetracht der langfristigen Vision der Dekarbonisierung des Unternehmens und der laufenden Aktivitäten von Corbion zur Verringerung seines CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks, sowie der Notwendigkeit, wesentliche Schritte zu unternehmen, um die THG-Emissionen in den Bereichen I, II und III bis 2030 um 33 % zu reduzieren, wurde beschlossen, die Fallstudie auf den Ersatz des erdgasbefeuerten zentralen 15-MW-Dampfkessels zu konzentrieren.

Eine erste Bewertung der technischen Möglichkeiten und der wirtschaftlichen Machbarkeit wurde durchgeführt und zwischen BTG und Corbion diskutiert. Vorgeschlagen wurden drei relevante Optionen: **Ersatz von Erdgas durch Strom aus erneuerbaren Energiequellen für die Dampferzeugung (Power-to-Heat), Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom und Biomasse für die Dampferzeugung.** Die Bewertungen führten zu den folgenden Feststellungen:

- **Eins Elektrokessel wurde für die weitere Analyse ausgewählt.** Nachteile sind die Abhängigkeit von niedrigen Strompreisen, hohe Netzanschlusskosten und Netzgebühren.
- **Die Verbrennung von Wasserstoff ist ein unkomplizierter Prozess.** Daher wurde er für die weitere Analyse ausgewählt. Hauptprobleme sind allerdings die derzeitige geringe Verfügbarkeit von kostengünstigem erneuerbarem Wasserstoff und das Fehlen einer Infrastruktur zur Versorgung mit Wasserstoff.
- Obwohl technisch und wirtschaftlich machbar, werden die Bioenergieoptionen von Corbion als Hochrisikotechnologie hinsichtlich Nachhaltigkeit und sozialer Akzeptanz eingestuft.
- Aufgrund seiner hohen volumetrischen Energiedichte ist **Pyrolyseöl logistisch gesehen die attraktivste Bioenergielösung** und wird für weitere Analysen in Betracht gezogen.<sup>59</sup>

# Sidenor

SIDENOR ist ein Stahlunternehmen, das in der europäischen Stahlindustrie führend bei der Herstellung von Langerzeugnissen aus Spezialstahl ist. Es ist auch ein wichtiger Lieferant von Kaltfertigprodukten auf dem europäischen Markt. Das Unternehmen hat Produktionszentren im Baskenland, in Kantabrien und Katalonien. Sidenor verfügt über hochspezialisierte Anlagen, die Lösungen für alle Industriezweige bieten, die hochwertigen Service im Stahlbereich benötigen.

Im Mittelpunkt der Studie stand das Werk von SIDENOR in Basauri im Baskenland, im Norden Spaniens. Dieses Werk wurde ausgewählt, da es den Energieverbrauch von SIDENOR nicht nur mengenmäßig, sondern auch in Bezug auf die Art der verbrauchten Energie gut repräsentiert. Die vorgeschlagenen Lösungen für Erneuerbare Energien umfassen die **Nutzung von Strom und Wärme.**



Abbildung 17: Die Produktionszentren von SIDENOR

Tabelle 11: Vergleich von Lösungen für Erneuerbare Energien zur weiteren Auswahl als Fallstudie für SIDENOR

Option	Technische Machbarkeit	Wirtschaftliche Machbarkeit	Logistisch umsetzbar am Standort Basauri	Vollständiger Ersatz von fossilen Energien	Nachhaltigkeit	Gesellschaftliche Akzeptanz	Ausgewählt als Fallstudie
PPAs *	+++	+++	---	+	+++	+++	Nein
Photovoltaik	+++	+++	+++	+	+++	+++	Nein
Grüner H <sub>2</sub>	++	+/-	---	++	+++	++	Ja
Biomethan	+	+++	---	++	+++	+	Ja
Pyrolyse **	++	++	+/-	+/-	++	+/-	Ja
Wärmepumpen	++	+	+++	++	+++	++	Nein

\* Power Purchase Agreements (Direktabnahmeverträge) / \*\* Biomasse für die Herstellung von Biokohle

- Zuerst wurden PPAs und die Installation von Fotovoltaikanlagen in den Werken von SIDENOR erörtert.
- Im Hinblick auf Erneuerbare Energien wurden Lösungen für Wärme, grünen Wasserstoff, Biomethan, Biokohle aus pyrolysiertes Biomasse und Wärmepumpen analysiert.
- Nach einer Analyse, die verschiedene Faktoren wie die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Lösungen, ihre logistische Umsetzung, den Anteil des Ersatzes der derzeitigen fossilen Energien, Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Akzeptanz berücksichtigt, **wurde beschlossen, grünen Wasserstoff, Biomethan und Biokohle für eine weitere Analyse auszuwählen.**<sup>59</sup>

# Vorstellung der Projektpartner

## Technologische und sozio-ökonomische Expertise

### Fundación CIRCE - Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (project coordinator)



Neben seiner Rolle als Koordinator ist CIRCE hauptverantwortlich für die Bewertung der bestehenden und künftigen Technologien im Bereich der industriellen Dekarbonisierung, sowie für die Analyse des Bedarfs der Industrie, basierend auf seiner umfassenden Erfahrung mit industriellen Umrüstungsprojekten und der Förderung Erneuerbarer Energien.

### BTG - Biomass Technology Group



BTG ist für die Entwicklung der RE4Industry-Methodik und für die Entwicklung von Aktionsplänen im Rahmen des EIIs zuständig. Sein interdisziplinäres Team verfügt über langjährige Erfahrung in der Analyse von Industrie- und Dienstleistungsinnovationen und hat bereits im Rahmen von EU-Projekten wie BIOFIT oder MUSIC an der Einführung biobasierter Technologien durch die EU-Industrie gearbeitet.

### CERTH HELLAS - Centre for Research and Technology



Als eines der führenden Forschungszentren Griechenlands verfügt CERTH über langjährige Erfahrung sowohl in der Technologieentwicklung als auch im Wissenstransfer im Energiesektor. Im Rahmen von RE4Industry ist CERTH hauptverantwortlich für die Analyse des aktuellen Status des EII-Sektors und die Identifizierung von Erfolgsbeispielen für die Integration Erneuerbarer Energien.

### WIP Renewable Energies



Als privates Unternehmen, das im Bereich der EE-Technologien tätig ist, leitet WIP die RE4Industry-Replikationsstrategie. Das Fachwissen beruht auf der Organisation von internationalen EE-Veranstaltungen, die die Kluft zwischen Forschung und Umsetzung von EE-Systemen überbrücken. Darüber hinaus arbeiten sie bei der Überwachung und Umsetzung von Projekten Hand in Hand mit der Industrie, was für die Maximierung der Auswirkungen von Replikationsanwendungen entscheidend ist.

### White Research



Als Sozialforschungs-KMU, das sich auf Marktanalysen, Geschäftsstrategien, Innovationsmanagement, politische und nutzerbezogene Fragen spezialisiert hat, ist WR für die Entwicklung der RE4Industry-Engagement-Strategie und die Expertennetzwerke verantwortlich und versorgt die Anwendungsfälle mit der erforderlichen Unterstützung, um rechtliche, soziale und finanzielle Herausforderungen zu überwinden, die die Einführung Erneuerbarer Energien in den Zielindustrien behindern könnten.

## Verbände für Erneuerbare Energien

### Bioenergy Europe



Als Stimme der europäischen Bioenergie für die Entwicklung eines fairen Marktes der Bioökonomie ist BIOEU für die Organisation der wichtigsten Lobbying- und Advocacy-Aktivitäten des Projekts verantwortlich. BIOEU wird von mehr als 40 Verbänden und 90 Unternehmen und F&E-Zentren unterstützt, wodurch RE4Industry über eine kritische Masse an Interessensvertretern im Bereich der Bioenergie verfügt, um seine Ziele zu erreichen.

### EEIP - Energy Efficiency in Industrial Processes



Als geschäftliche und politische Plattform für die Energiewende, die sich mit neuen technischen Lösungen und Geschäftsmodellen befasst, die das Marktwachstum beschleunigen, ist EEIP für die Verbreitungs- und Kommunikationsaktivitäten des Projekts verantwortlich und bedient sich dabei der Nutzer des EEIP-Netzwerks, das die gesamte Wertschöpfungskette abdeckt (Angebots- und Nachfrageseite der im Rahmen von RE4Industry untersuchten EE-Technologien).

### ESEIA - European Sustainable Energy Innovation Alliance



ESEIA ist die europäische Innovationsallianz für nachhaltige Energie und umfasst 27 führende Forschungs- und Innovationsorganisationen auf dem Gebiet der nachhaltigen Energiesysteme aus 13 verschiedenen europäischen Ländern.

## Energieintensive Industrien

### SIDENOR



SIDENOR ist der größte spanische Hersteller von Spezialstahl, Schmiede- und Gussteilen, sowie einer der wichtigsten Hersteller von Gesenkschmiedestücken und die RE4Industry Fallstudie für die Validierung der RE4Industry-Methodik in Spanien. Darüber hinaus verfügt das Unternehmen über mehrere Produktionsstandorte in Deutschland, Frankreich, Italien und Großbritannien, was den internen Transfer von Ergebnissen innerhalb der EU ermöglicht.

### MYTILINEOS



MYTILINEOS ist Europas größter vertikal integrierter Hersteller von Primäraluminium und besitzt Bauxitminen, Aluminiumoxidraffinerien und Aluminiumschmelzwerke. MYTILINEOS ist die RE4Industry Fallstudie für Griechenland und setzt seine Aktivitäten zur Optimierung der Energieeffizienz und zur Verringerung der Treibhausgasemissionen fort. Die Produktionsanlagen innerhalb und außerhalb Europas ermöglichen die Übertragung der Ergebnisse auf eine Vielzahl von Ländern.

### PURAC (CORBION)



CORBION ist Weltmarktführer bei Milchsäure und Milchsäurederivaten und ein führendes Unternehmen bei Emulgatoren, funktionalen Enzymmischungen, Mineralien, Vitaminen und Algeninhaltsstoffen. Corbion ist somit ein starkes Unternehmen für nachhaltige Inhaltsstofflösungen in den Bereichen Biochemie und Lebensmittel und ist die RE4Industry Fallstudie in den Niederlanden.



# RE4iINDUSTRY

Renewable energies for industries



Dieses Projekt wurde mit Fördermitteln aus dem Horizont 2020 Forschungs - und Innovations Programm der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 952936 finanziert.



**RE4iINDUSTRY**  
Renewable energies for industries

